Digitized by the Internet Archive
in 2010 with funding from
University of Ottawa

http://www.archive.org/details/lmentsdephys01poui

ÉLÉMENTS

DE

PHYSIQUE EXPÉRIMENTALE

ET DE

MÉTÉOROLOGIE.

Imprimerie et Fonderie de Félix Locquin et Compagnie,
16, rue N.-D.-des-Victoires.

ÉLEMENTS

DE

PHYSIQUE

EXPÉRIMENTALE

ET DE

MÉTÉOROLOGIE

PAR M. POUILLET,

DE L'ACADÉMIE ROYALE DES SCIENCES DE L'INSTITUT DE FRANCE; PROFESSEUR DE PHYSIQUE A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS; PROFESSEUR DE PHYSIQUE APPLIQUÉE AUX ARTS, AU CONSERVATOIRE ROYAL DES ARTS ET MÉTIERS, ADMINISTRATEUR DE CET ÉTABLISSEMENT, MEMBRE DE LA SOCIÉTÉ PHILOMATIQUE, DU CONSEIL DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMEMENT, ETC, ETC.

OUVRAGE ADOPTÉ, PAR LE CONSEIL ROYAL DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE, POUR L'ENSEIGNEMENT DE LA PHYSIQUE DANS LES ÉTABLISSEMENTS DE L'UNIVERSITÉ.

Troisième Édition.

Verus experientiæ ordo primò lumen accendit
Deindè per lumen iter demonstrat.
BACON, *Nov. Or.*

TOME PREMIER.

J. M. — Pouillet

PARIS.

BECHET JE., LIBRAIRE DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE,
PLACE DE L'ÉCOLE DE MÉDECINE, N. 4.

DÉCEMBRE 1837.

AVERTISSEMENT

SUR

LA TROISIÈME ÉDITION

DES

ÉLÉMENTS DE PHYSIQUE

ET DE

MÉTÉOROLOGIE.

Dans le court espace de temps qui s'est écoulé, depuis que la seconde édition de cet Ouvrage a été soumise au public, les progrès de la science ont été marqués par de nombreux travaux et par d'importantes découvertes; on a vu de toutes parts, soit en France, soit à l'Étranger, une foule de jeunes gens se livrer à des recherches intéressantes et associer ainsi leurs noms aux noms éminens des physiciens qui dans ces dernières années ont imprimé une si vive impulsion à toutes les branches de la physique. Tant de résultats nouveaux obtenus en si peu de temps, en France, en Angleterre, en Italie, en Allemagne, en Russie et en Amérique, sont la preuve la plus frappante que la science est pour ainsi dire à sa naissance et que nous commençons à peine à posséder les vrais moyens d'observation qui doivent nous

conduire un jour à enchaîner l'ensemble des phénomènes naturels par des lois générales et certaines.

Si les grandes divisions de la physique sont tracées depuis long-temps, si la pesanteur, la chaleur, l'électricité, le magnétisme, les actions moléculaires, l'acoustique et l'optique, constituent la physique moderne comme la physique ancienne, ce n'est pas une raison de penser que notre siècle est stationnaire ou que la physique est à son terme; on peut en conclure seulement que les forces auxquelles est soumise la matière sont en petit nombre, qu'elles se sont révélées aux anciens observateurs par des phénomènes plus ou moins apparens, et que dès l'origine il a été facile d'en faire la classification et le dénombrement général; on peut en conclure encore que le véritable but de la science n'est pas de chercher à découvrir des forces nouvelles, mais de déterminer les lois et les modes d'action des forces connues. Telle est en effet la direction qui est suivie depuis plus de trois siècles, sur les traces de Képler, de Galilée, de Descartes, de Pascal et de Newton, qui ont les premiers ouvert à l'esprit humain cette vaste carrière. Combien de grandes découvertes ont enrichi la science pendant ces trois siècles, les plus brillans de l'histoire du monde! et cependant combien nos connaissances paraissent restreintes et bornées lorsqu'on jette un coup d'œil profond sur les mystères sans nombre qui nous environnent de toutes parts. A mesure que la science marche, notre es-

prit semble s'élever sur un plus vaste horizon d'où il aperçoit des régions nouvelles de plus en plus étendues qui restent à explorer. Nous commençons à sortir des ténèbres, notre vue s'affermit à la lumière, et nous pouvons mieux juger qu'à aucune autre époque des secours solides et puissans que la science peut prêter à la civilisation. Les théories se développent, les applications se multiplient, les entreprises industrielles y puisent des ressources jusqu'alors inconnues : après avoir pris son rang dans l'enseignement général pour habituer l'intelligence à la logique des faits, qui est à la fois si féconde et si lumineuse, la physique pénètre dans les ateliers pour y porter le goût de l'exactitude et pour y donner l'essor au génie d'invention. C'est par l'heureux concours de tant de circonstances que les découvertes succèdent aux découvertes avec une rapidité sans exemple, et que nous voyons d'un instant à l'autre un nouvel ordre de phénomènes ouvrir de nouvelles voies à nos recherches.

Au milieu de ce mouvement universel de la science, au milieu des modifications plus ou moins profondes et toujours progressives qu'elle éprouve, les traités élémentaires sont nécessairement incomplets : s'ils présentent avec exactitude le tableau de nos connaissances, ce ne peut être que pour l'instant où ils paraissent ; quelques mois suffisent pour que ce tableau devienne infidèle. Ce n'est pas cependant que telle proposition qui semble vraie aujourd'hui puisse

être fausse demain, car nous avons heureusement des méthodes expérimentales assez sûres pour ne pas confondre l'erreur avec la vérité : les résultats ne changent pas, ils restent constans et acquis au domaine de la science, mais ils s'étendent, ils se généralisent, et surtout par le seul fait d'une observation nouvelle ils peuvent souvent être démontrés d'une manière plus nette ou plus simple. Dans l'enseignement comme dans les traités spéciaux, il faut donc s'appliquer avec un soin infini, non seulement à ne rien omettre d'essentiel, mais encore à rapprocher les expériences et les faits, et à les classer autant que possible dans un ordre logique qui les enchaîne étroitement.

C'est ce que j'ai essayé de faire avec un nouveau soin dans cette troisième édition, et pour cela j'ai dû en remanier complètement presque toutes les parties.

Dans la pesanteur, on trouvera les principaux résultats obtenus par M. Savart sur l'écoulement des fluides, et sur les phénomènes si remarquables que présentent les veines fluides dans leur choc contre une surface plane ou cylindrique.

Dans la chaleur, les belles observations de M. Melloni, et de quelques autres physiciens, sur les propriétés du calorique rayonnant, m'ont semblé tout à fait décisives pour renvoyer à la suite de la lumière, comme M. Biot l'avait fait autrefois, tout ce qui est

relatif à la communication de la chaleur par voie de rayonnement : c'est ce qui constitue la seconde partie de la chaleur, qui sera en quelque sorte toute nouvelle. La première partie a reçu aussi une extension considérable par mes recherches sur les hautes températures, dont j'ai essayé de donner une idée assez étendue.

Dans l'électricité et le magnétisme, il y a surtout un grand nombre de changemens et des additions très importantes. Les nombreux phénomènes récemment découverts par M. Faraday méritaient surtout une attention particulière, et il m'a semblé nécessaire de traiter aussi avec quelques développemens les questions relatives aux lois de l'intensité des courans thermo-électriques et hydro-électriques qui ont fait le sujet de deux Mémoires que j'ai présentés à l'Académie des Sciences dans le cours de cette année.

Dans l'acoustique, j'ai dû surtout faire tous mes efforts pour reproduire les principaux résultats dus aux recherches si importantes de M. Savart.

Dans l'optique, il n'y a de changemens essentiels que sur les phénomènes de polarisation circulaire, dont M. Biot a su faire une si heureuse application à l'étude des forces chimiques.

Enfin, dans la météorologie, je me suis attaché à

donner des détails plus précis sur les différens moyens d'observation, et à rapprocher tous les documens authentiques qu'il m'a été possible de recueillir.

Malgré les additions nombreuses et très étendues, mais en supprimant quelques détails et en adoptant un ordre nouveau sur plusieurs questions, et surtout en employant une impression un peu plus serrée, il m'a été possible de réduire mon Ouvrage à deux volumes, qui ne devront pas se subdiviser en deux parties comme ceux de l'édition précédente.

Le premier volume contient les notions préliminaires, la pesanteur, la première partie de la chaleur, le magnétisme, l'électricité, le galvanisme, et l'électro-magnétisme.

Le deuxième volume contient les actions moléculaires, l'acoustique, l'optique, la deuxième partie de la chaleur, et la météorologie.

Les planches ont été refaites en totalité; tous les appareils ont été dessinés par M. Silbermann, qui me seconde depuis long-temps dans mes recherches avec infiniment de zèle et d'intelligence; nous nous sommes appliqués à représenter les principales machines de manière à faire comprendre les détails de leur construction.

Après avoir fait ces nouveaux efforts pour répondre, autant qu'il m'est donné de le faire, à l'extrême bienveillance avec laquelle le Public a accueilli les

deux premières éditions des Elémens de Physique, il me reste à demander avec instance aux personnes qui voudront bien se servir de mon Ouvrage, et surtout à MM. les Professeurs des Facultés et des Collèges royaux, d'avoir la bonté de continuer à me communiquer leurs observations sur tous les points qui pourraient leur paraître douteux ou obscurs; j'ai profité avec reconnaissance des conseils qui m'ont été donnés à cet égard, et je me ferai toujours un devoir de les accueillir avec le même empressement. Les traités élémentaires doivent surtout présenter les méthodes et les lois de la science avec cette vive lumière qui donne à l'intelligence de l'essor et de la force; c'est là leur condition la plus essentielle, et il me semble que pour la remplir rien ne peut être plus profitable à l'auteur que l'opinion sincère et bienveillante de son lecteur.

Paris, le 10 *décembre* 1837.

ERRATA.

PAGES.	LIGNES.	FAUTES.	RECTIFICATIONS.
4	34	du temps	3. Du temps
41	20	point d'appui	point d'appui (*fig.* 17-18)
55	25	de l'espèce	de l'espace
62	6	*d c*	*d*
ib.	8	*d*	*d c*
80	2	*v x*	*v v*
107	19	*d, e, f* (	*d, e, f, g* (
110	10	tirant le fil l'obturateur	tirant le fil, l'obturateur
113	2	*c*	*g*
124	1	63	68
126	28	*c d''*	*c d*
142	24	*c d*	*e d*
149	10	(74)	(79)
164	11	et *d'*	et d
ib.	31	*c*	c
ib.	35	*c*	c'
195	formule.	(*log e—log p*)	(log p—log p')
196	26	*b à b'*	b et b'
222	2e tableau.	0 à 103	0 à 100
228	21	*f*	m
231	9	réservoir de chauffe et	réservoir de chauffe *a* et
234	2	manchon *l* soit	manchon *l* (*fig.* 196) soit
ib.	33	rathétomètre	kathétomètre
239	26	(*fig.* 220)	(fig. 222)
245	dernière.	des aeromètres	des aréomètres
251	2e colonne.	(chaux carbonaté lasselaire)	(chaux carbonaté lamellaire)
258	28	ces dispositions	ces dissolutions
276	23	(132)	(133)
281	sous le tableau.	page 285)	page 240.)
282	5	page 285	page 240
287	17	(fig. 202)	(fig. 208)
306	27	de la figure 203	de la figure 225
315	24	figure 255	figure 235
319	pénultième.	sur lui. Par	sur lui (fig. 253). Par *exemple*
330	31	*i c n,*	*u c n*
334	14	*p*, pivot	*t*, pivot
335	10	figure 262)	(figure 263)
336	20	302. Boussole	168 bis. Boussole
343	5	la lunette *l*.... du bon axe	supprimez ce membre de phrase
347	21	*m s i n i*	*m sin n*
348	22	et 276)	et 278)
364	16	*a v a'*	*a c a'*
367	8	agissant à 13°	agissant à 12°
ib.	9	2880 + 18 =	2880 + 12
368	1	aiguille d'épreuve, de	aiguille d'épreuve (*fig.* 252), de

PAGES.	LIGNES.	FAUTES.	RECTIFICATIONS.
387	20	de clinquant *c*	de clinquant *e*
400	16	figure 66	figure 290
408	11	d'or massif	d'or mussif
410	5	(*fig.* 296)	(*fig.* 295)
427	7	avec la boule *b'*	avec la boule *b*
476	10	figure 345	figure 343
479	29	de la pile : alors	de la pile (*fig.* 352) : alors
500	4	(204)	(234)
501	26	fil de métal	fil de métal (*fig.* 257)
532	5	(224)	(234)
544	tableau.	admium	cadmium
579	ib.	zinc.... 0,03	zinc..... 0,93

REMARQUES SUR QUELQUES FIGURES.

Fig. 131. Cette figure correspond au numéro 90 du texte, elle est destinée à faire voir la différence de vitesse que doit prendre le liquide en traversant les différentes sections du vase, dans l'hypothèse du parallélisme des tranches.

Fig. 146 et 147. Ces deux figures représentent l'effet du choc d'une veine fluide ascendante contre un corps solide.

Fig. 216. L'appareil représenté par cette figure est propre à montrer le maximum de densité de l'eau : pour cela, on met de la glace dans le manchon qui enveloppe le vase lui-même.

Fig. 227. Bouillant de Franklin. Cet appareil est purgé d'air, et il contient de l'éther coloré ; la simple chaleur de la main appliquée sur l'une des boules suffit pour déterminer dans l'autre boule une ébullition apparente, résultant de l'affluence du liquide qui s'y trouve poussé par la force élastique développée dans la première boule par l'action de la chaleur.

Fig. 252. Aiguille d'épreuve dont il est parlé dans les numéros 165 et 180 du texte.

Fig. 253. Cette figure représente l'aimantation par simple friction.

Fig. 352. Cette figure représente l'expérience dont il est parlé dans le numéro 288 du texte.

ELEMENS

DE PHYSIQUE

EXPÉRIMENTALE

ET

DE MÉTÉOROLOGIE.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

CHAPITRE PREMIER.

Des Phénomènes naturels. — De l'Espace. — Du Temps. — De la Matière. — Des Forces. — Du Mouvement. — De l'Inertie.

1. Les phénomènes naturels qui se renouvellent sans cesse sur la terre et dans le ciel offrent à nos yeux un si grand spectacle, et à notre curiosité un attrait si puissant, que nous sommes entraînés malgré nous à méditer sur l'ensemble des causes qui produisent des effets si merveilleux. A peine sommes-nous sortis de la première enfance que nos regards s'attachent aux divers objets que la nature nous présente :

nous observons, de toute l'activité de notre esprit, la forme du sol et des montagnes; la pesanteur des corps; les mouvemens de l'eau, de l'air et des nuages; la voûte brillante du ciel et les apparences infiniment variées des astres sans nombre qui semblent la parcourir avec une régularité si surprenante. Nous sommes nés observateurs, et sous ce rapport tous les hommes sont physiciens. Mais, au milieu de la multitude des phénomènes qui nous environnent, il n'est pas donné à notre intelligence de s'élever immédiatement à la connaissance des causes et des lois générales auxquelles ces phénomènes sont soumis; aussi, rien n'est plus curieux pour l'histoire de l'esprit humain que de suivre, à travers le développement des siècles, les idées singulières que les hommes se sont faites successivement sur les propriétés des corps, sur les élémens qui les composent, sur les principes et sur les causes qui agitent la matière, et qui maintiennent l'harmonie du monde. Quelle confusion d'hypothèses et d'erreurs, au milieu desquelles les hommes de génie ont jeté çà et là quelques vérités fécondes! Et même de notre temps, qu'y a-t-il de plus curieux que d'interroger les divers esprits, depuis les plus vulgaires juqu'aux plus habiles, et d'entendre leurs idées sur les phénomènes de la nature, sur les effets de l'air et de l'atmosphère, sur l'équilibre des eaux tout autour de la terre, sur les effets de la chaleur et de la lumière, sur la météorologie, sur la cause du tonnerre, par exemple, que l'on n'ose plus personnifier, il est vrai, mais que quelques personnes se représentent encore comme ayant une forme et un corps! Quelle variété d'images et de conceptions! quelle différence entre les hommes! quelle différence entre les peuples! On peut dire que dans une seule génération se retrouvent les opinions de tous les siècles: dans un esprit inculte, chez un peuple ignorant, toutes les erreurs avec tous les préjugés des siècles passés; dans un esprit cultivé, chez un peuple ami des lumières, toutes les connaissances qui se sont transmises d'âge en âge, et

toutes les lois générales auxquelles la raison a pu s'élever.

La physique, qu'on appelle aussi la philosophie naturelle, n'est qu'une partie de ces connaissances, qui forment le vaste domaine des sciences de notre époque; elle en est la partie philosophique et fondamentale. On a coutume de dire qu'elle a pour objet les propriétés des corps et les actions qu'ils exercent à de grandes distances; c'est en effet ce qu'on en peut dire de plus simple, quand on veut absolument la définir d'une manière générale. Mais, tenter de définir une science, c'est consentir à être inintelligible; car une science ne peut pas se définir par quelque propriété caractéristique et frappante comme un objet matériel, ou comme une figure de géométrie. Ainsi on nous permettra sans doute de commencer l'étude de la physique, plutôt en essayant de donner des notions claires et précises des objets dont elle s'occupe, qu'en essayant de donner des définitions vagues et obscures du but qu'elle se propose.

2. *De l'Espace.* — Nous concevons très-facilement les longueurs et les distances : une longueur de six pieds est une chose qui nous est familière, et nous concevons avec la même facilité la distance qui nous sépare d'un point éloigné de l'horizon, ou même celle qui nous sépare du soleil ou des étoiles. Nous comprenons tous de la même manière les étendues en superficie, comme la surface d'un grand lac ou la surface de la mer, et les étendues en volume, comme un mètre cube de marbre ou de pierre, le volume d'une maison ou celui d'une montagne. Concevons donc un mètre cube de marbre qui soit suspendu au milieu d'une masse d'eau; nous savons qu'il peut être déplacé, et qu'à l'instant l'eau vient remplir la place qu'il occupait : mais imaginons que l'eau n'y vienne pas, qu'elle soit arrêtée de quelque manière; ou plutôt concevons que le cube de marbre puisse être anéanti, qu'il ne reste de lui que ses six faces, et qu'elles soient capables de retenir l'eau exactement des six côtés différens. Ce volume où il n'y aurait plus de marbre, et où il n'y aurait

point d'eau, ni aucune autre chose, c'est de l'*espace*, c'est l'espace qu'occupait le mètre cube de marbre et que nous pouvons concevoir privé de toute matière. Quelques métaphysiciens l'appellent l'*espace pur*, et les physiciens l'appellent l'*espace vide*. Nous en avons limité l'étendue pour en avoir une idée plus juste; mais ce que nous disons d'un mètre cube pourrait se dire d'un volume beaucoup plus grand. Nous pouvons concevoir qu'une montagne s'anéantisse, depuis son sommet jusqu'à sa base, et notre esprit conserverait encore l'idée du volume ou de l'espace qu'elle occupait. Il en serait de même de tout le globe de la terre : et il ne faut pas plus d'effort pour concevoir le volume qu'il occupe que pour concevoir le volume occupé par une bille de billard ou par un boulet de canon.

Au-dessus de nos têtes est l'atmosphère, et au-dessus de l'atmosphère est le vide du ciel. Notre esprit peut s'élever aussi dans ces régions : il peut se fatiguer à les parcourir dans tous les sens; il rencontre, au milieu de ces espaces, des corps comme la terre, des astres sur lesquels il se repose; mais, quelle distance les sépare, quel abîme est au delà ! Cette voûte du ciel n'est qu'une apparence ; elle n'a rien de solide, et, fût-elle solide comme du diamant, notre esprit ne s'y arrête pas; il en pénètre la profondeur; il poursuit l'espace au-delà de cette voûte et au-delà des étoiles ; il conçoit que toute limite est impossible ; il embrasse l'immensité, et conçoit quelque chose de plus grand. Ainsi l'espace est indéfini pour nos conceptions, et, par conséquent, infini dans la réalité.

Une portion limitée de l'espace est dans notre langage ce que nous appelons l'*étendue;* mais il peut arriver que l'on dise l'espace d'un mètre cube, au lieu de dire l'étendue d'un mètre cube. Il n'en résulte aucune confusion pour les discussions physiques.

Du temps. — On dit communément que l'homme, à l'aspect des phénomènes naturels, prend l'idée de succession et

celle du *temps*. Ainsi, dit-on, le printemps succède à l'hiver, et le jour à la nuit; voilà l'idée de succession : l'eau qui coule succède à l'eau qui s'est écoulée, le flux de la mer succède au reflux; voilà l'image du temps. Mais il n'est besoin ni de phénomènes extérieurs, ni d'aucune action produite sur nos sens, pour que nous ayons présentement l'idée du temps: nous pensons et nous avons la conscience de nos pensées; nous pensons successivement, et nous avons l'idée de succession et de continuité. Sans doute, ce phénomène intérieur ne nous permet de compter ni les heures, ni les jours, ni les années; mais avoir l'idée du temps et avoir le moyen de le mesurer sont deux choses différentes. Tous les mouvemens extérieurs pourraient être suspendus, les astres pourraient cesser de tourner, les nuages pourraient être immobiles, l'eau cesser de couler; et cependant, au milieu de ce repos universel, nous saurions encore que le temps se peut subdiviser, bien que nous n'eussions plus alors aucune mesure de ces subdivisions.

L'idée du temps et celle de l'espace se retrouvent dans toutes nos perceptions et dans toutes nos idées, le néant est incompréhensible pour nous, ou plutôt, quand nous essayons de le comprendre, nous ne comprenons autre chose que l'espace et le temps.

4. *De la matière et des divers états des corps*. — L'idée d'espace est une idée complète qui se suffit à elle-même, c'est-à-dire que nous pouvons concevoir l'espace et rien dans cet espace; mais elle n'est point une idée exclusive avec laquelle rien ne se puisse associer. Dans l'espace, nous pouvons concevoir *l'impénétrabilité*, et l'impénétrabilité c'est *la matière*. On n'a pas raison de dire que la matière a deux propriétés essentielles : *l'étendue* et *l'impénétrabilité ;* ce ne sont pas des propriétés, c'est une définition. On conçoit l'impénétrabilité ; on l'appelle matière, et voilà tout.

Nous pouvons concevoir l'espace limité ou indéfini, et nous pouvons comprendre de même que l'impénétrabilité soit

limitée ou indéfinie, qu'elle occupe un petit volume comme une goutte d'eau, ou un grand volume comme le globe de la terre. Ici se présente une autre idée fondamentale : nous pouvons concevoir que l'impénétrabilité soit continue et inséparable, ou bien qu'elle soit discontinue, et par conséquent séparable. L'impénétrabilité inséparable est ce qu'on appelle un *atome*. L'idée de grandeur ou de petitesse n'entre pour rien dans la conception d'un atome, non plus que l'idée de forme : on peut concevoir un atome très petit ou un atome très grand ; on peut concevoir qu'il soit rond, carré, pointu, ou de toute autre forme bizarre que l'imagination puisse inventer. Seulement, nous supposons bien que le monde entier n'est pas un grand atome, et que la matière n'est pas toute d'une pièce ; car la terre et la lune sont deux fragmens de matière séparés l'un de l'autre, et à la surface de la terre nous voyons que la matière en général se brise et se désunit ; ce qui prouve assez, d'après notre définition, que la terre non plus n'est pas un atome. Sur le reste, c'est à l'expérience à nous instruire : et toutes les données de l'expérience nous portent à conclure que la matière n'est pas indéfiniment séparable en parties, qu'à un certain degré de petitesse, qui est bien au-dessous de ce que nos sens peuvent saisir, il y a des parcelles de grandeur finie, qui restent absolument inséparables et qui forment par conséquent de véritables atomes. Les découvertes récentes semblent surtout confirmer cette opinion, et c'est aujourd'hui celle qu'on adopte exclusivement.

Ainsi, nous admettons l'existence des atomes comme une vérité fondamentale qui doit nous servir de guide dans nos recherches. Une réunion d'atomes est ce qu'on appelle un *corps*. Les corps auront en général un plus grand ou un plus petit volume, suivant qu'ils seront composés d'un nombre d'atomes plus grand ou plus petit ; ils auront des apparences différentes, si les atomes sont diversement arrangés pour les composer ; ils auront une différence un peu plus marquée,

si les atomes diffèrent par leur forme ou leur grandeur, et enfin ils pourront être essentiellement différens, s'il existe des atomes qui diffèrent par leur nature substantielle.

Dans un volume donné d'un corps, dans une boule d'or, par exemple, on ne suppose pas que tous les atomes soient arrangés de la même manière, et tous également distans les uns des autres; mais on est conduit à supposer que plusieurs atomes sont groupés de manière à former ce qu'on nomme une *molécule*, une *particule*, et que les molécules sont groupées à leur tour pour donner au corps sa structure et son ensemble. Ainsi deux molécules ont en général bien plus de distance entre elles que n'en ont entre eux les atomes qui les composent. C'est là le sens propre qu'on attache à ces mots, *molécules* et *particules*, qui sont à-peu-près synonymes; mais quelquefois on les prend dans un autre sens, comme quand on dit : les molécules des corps sont ébranlées par le choc, elles sont en vibration dans les corps sonores, elles sont dilatées par la chaleur, traversées par la lumière, etc. ; alors on ne veut plus parler strictement de chaque groupe d'atomes en particulier, mais l'on veut parler, d'une manière vague, de petites portions que l'on conçoit dans l'intérieur des corps et que l'on sépare par la pensée. Enfin, quand on brise un corps, on se sert encore des mots molécules et particules pour en désigner les plus petits fragmens.

Nous ne distinguons que trois états différens dans l'immense variété des corps qui sont soumis à nos observations : ces corps sont *solides*, comme les pierres, les métaux et les tissus organiques ; ils sont *liquides*, comme le mercure, l'eau, l'esprit-de-vin ou les fluides des corps vivans ; ou enfin ils sont *gazeux*, comme l'air. Les liquides et les gaz se désignent quelquefois par un nom commun, on les appelle des *fluides*. Une chose digne de remarque, c'est qu'un même corps peut être tantôt solide, comme la glace, tantôt liquide, comme l'eau, tantôt gazeux, comme la vapeur. Nous verrons dans quelles circonstances et sous quelles conditions se pro-

duisent ces *changemens d'état*; pour le moment, il suffit de les indiquer, parce qu'ils sont connus de tout le monde, et parce qu'en y réfléchissant on habitue l'esprit à pénétrer dans l'intérieur des corps et à bien comprendre qu'ils ne sont que des assemblages ou des agglomérations d'atomes; que ces atomes sont séparés les uns des autres, et maintenus à des distances plus ou moins grandes, et qu'enfin il est possible que, sans se toucher, ils agissent de concert et se communiquent des pressions ou des mouvemens.

5. *Des Forces.* — Les atomes simplement posés à côté les uns des autres ne pourraient constituer ni les corps solides, ni les autres corps de la nature; ils ne feraient tout au plus qu'un amas incohérent, pareil à un monceau de sable ou de poussière. Une pierre ou un morceau de fer sont des corps solides et résistans : il faut donc qu'il y ait *quelque chose* qui retienne les atomes, qui les attache l'un à l'autre, qui les fixe à leur place. Les corps se briseraient sans effort s'il n'y avait que des atomes simplement juxtà-posés, ou plutôt il n'existerait pas de corps; il n'existerait que de la poussière. Nous concevons que dans un morceau de fer un atome quelconque est pressé contre les atomes voisins, comme un bloc de pierre est pressé contre le sol; pour soulever la pierre il faut un certain effort; pour arracher l'atome, si l'on pouvait le saisir, il faudrait aussi un effort plus ou moins grand. Les *causes* de ces *pressions* ou de ces *actions mutuelles* que les diverses portions de la matière exercent les unes sur les autres, sont ce que l'on appelle en général des *forces*.

Ainsi, il y a des forces qui agissent sur les atomes de fer, qui les pressent les uns contre les autres, qui les retiennent en leur lieu, et qui donnent à la masse cette fixité que nous observons. De même, il y a des forces qui agissent sur les molécules de tous les corps solides, et qui leur donnent, à l'intérieur, une structure déterminée, et à l'extérieur une forme permanente. Enfin, comme il n'y a pas

de corps qui n'ait une certaine manière d'être, et une certaine dépendance entre ses parties, on en conclut que, là où il se trouve plusieurs atomes voisins, il y a toujours entre eux une action mutuelle, par laquelle ils se sollicitent les uns les autres et prennent un arrangement déterminé.

Les liquides, qui sont si mobiles, ont eux-mêmes cette dépendance entre toutes leurs parties voisines : une goutte d'eau a toujours une forme particulière, soit qu'on l'observe sur quelque surface ou plutôt sur les plantes où elle se dépose en rosée, soit qu'on l'observe aux extrémités des corps où elle se tient suspendue. Cette forme qu'elle prend est le résultat de l'action des molécules qui la composent, car, sans actions mutuelles, ces molécules resteraient séparées et tomberaient isolément.

L'air, qui est invisible et qui est si subtil, n'est pas une exception à cette loi générale. Il est impénétrable, puisqu'il résiste quand il est enfermé dans une vessie, dans un ballon ou dans un autre espace quelconque. Donc, il est aussi composé d'atomes et de molécules; donc ses diverses parties exercent aussi une action mutuelle les unes sur les autres : entre mille phénomènes qui en sont la preuve, nous citerons seulement le phénomène de la respiration, que tout le monde peut observer. L'air extérieur pénètre dans les poumons, à mesure que la poitrine s'ouvre pour le recevoir; ainsi les molécules du dehors agissent sur les molécules du dedans, elles les pressent et les forcent d'entrer, et, quand l'air est enfermé dans la poitrine, les molécules intérieures réagissent aussi les unes sur les autres pour en remplir toute la capacité, comme elles réagissent les unes sur les autres pour se répandre dans toute l'étendue d'un vase, quelque grand qu'il soit.

Ces forces, qui agissent sans cesse dans l'intérieur d'un corps entre toutes les molécules voisines, ou entre tous les atomes qui composent une molécule, s'appellent *forces mo-*

léculaires, ou *attractions moléculaires* : il serait mieux de les appeler *actions moléculaires*, ou *forces atomistiques*, ou *forces constitutives des corps*, puisqu'en effet ce sont ces forces qui donnent aux corps leurs constitutions particulières et leurs modes d'existence. Nous examinerons plus tard s'il n'y a qu'une seule force de cette nature, ou s'il y en a plusieurs qui se combattent, qui se balancent, et qui sont tour à tour plus grandes ou plus petites.

Outre les forces moléculaires, il y a des forces d'une autre nature : les corps tombent d'eux-mêmes, quand on les abandonne; les rivières coulent sans cesse; le soleil semble tourner autour de la terre : voilà des *mouvemens* que nous observons, et nous jugeons dans notre pensée que la matière pourrait *exister* sans que ces mouvemens fussent *produits*. Ils ne sont donc que des *effets* accidentels dus à des causes déterminées. Ces causes du déplacement des corps ou des *mouvemens de translation* s'appellent aussi des *forces* ou des *puissances*. Elles ont sans doute des rapports avec les forces moléculaires, qui peuvent aussi, dans certains cas, imprimer des mouvemens de translation; mais en général on les distingue, comme nous le verrons plus loin.

6. *Du repos et du mouvement.* — Les idées de *repos* et de *mouvement* sont, comme l'idée d'impénétrabilité, des conceptions simples et primitives, qui ne peuvent ni se décomposer ni se définir. On conçoit le repos, on conçoit le mouvement, on peut aider un esprit à comprendre ces choses d'une manière plus générale ou plus féconde, mais, dans aucune langue, on ne peut les expliquer ni l'une ni l'autre que par des mots équivalens. Dès-que nous avons l'idée d'espace et l'idée de nous-mêmes, nous nous prenons pour un centre autour duquel l'espace indéfini se développe, et nous avons l'idée de direction, de distance, et de situations respectives. Nous avons besoin de l'aspect du ciel pour nous *orienter* par rapport au soleil et aux astres, mais

nous n'avons besoin que du sentiment de nous-mêmes pour nous *orienter* par rapport à nous : à moins de tout confondre, nous ne confondons pas l'espace qui est devant nous avec l'espace qui est au-dessus de nos têtes ou sous nos pieds, ni celui qui est à droite avec celui qui est à gauche. L'homme qui a vécu dans les ténèbres, soit à la surface de la terre, soit au fond des mines, ne sait ce que c'est que l'orient, l'occident ou les pôles du monde, toutes choses qui se rapportent à l'aspect du ciel qu'il ne connaît pas; cependant il conçoit l'espace, et par la pensée il le sépare en diverses régions qui ont rapport à lui-même; en régions latérales, antérieures et postérieures, et en régions hautes ou régions basses. Nous pouvons tous faire abstraction de la matière, sans pouvoir jamais faire abstraction de nous-mêmes; et, une fois que nous avons de la sorte pris possession de l'espace, nous pouvons comprendre que rien ne change plus ni en nous ni autour de nous : nous avons alors l'idée de *repos* et de *repos absolu;* car on appelle repos absolu d'un corps la persistance réelle de ce corps dans le même lieu de l'espace. De même, nous pouvons comprendre qu'il arrive un changement de place; nous pouvons comprendre que nous avançons ou que nous reculons dans une de ces régions idéales, que nous allons d'un côté ou de l'autre; que nous montons ou que nous descendons : alors nous avons l'idée du *mouvement* et l'idée du *mouvement absolu*; car on appelle *mouvement absolu* d'un corps le déplacement réel de ce corps dans l'espace.

Il y a deux choses essentielles à considérer dans le mouvement : sa direction et sa lenteur ou sa rapidité, qu'il ne faut pas confondre avec sa vitesse dont nous parlerons plus loin. Si le *mobile*, ou le corps qui se meut, parcourt une ligne droite, le mouvement est dit *rectiligne*, et la droite parcourue par le mobile est la direction du mouvement; au contraire, si le mobile parcourt une courbe quelconque, le mouvement est dit *curviligne*, et l'on dit encore que la

courbe qu'il parcourt est en général la direction du mouvement. Mais dans ce dernier cas, pour exprimer sa direction dans un instant quelconque, il faut remarquer qu'entre deux points d'une courbe, on peut mener une infinité de tangentes ou de lignes droites qui ne font que toucher la courbe; alors le mobile étant en même temps sur la courbe et sur une tangente, on dit que la direction de son mouvement est celle de la tangente sur laquelle il se trouve. Ainsi, dans le mouvement curviligne, le mobile change à chaque instant de direction, et, s'il parcourt un cercle entier, il a véritablement passé par toutes les directions possibles. Pour la lenteur et la rapidité du mouvement, on dit en mécanique, comme dans le langage ordinaire, qu'un mouvement est plus lent quand le mobile parcourt moins d'espace dans le même temps, et qu'il est plus rapide quand il parcourt un espace plus grand. Seulement, il faut prendre garde que, de deux mouvemens donnés, celui qui serait le plus lent, en ne considérant que les espaces parcourus pendant une seconde par exemple, pourrait être le plus rapide, si l'on considérait les espaces parcourus pendant une heure ou pendant un jour; car on conçoit qu'un même mouvement peut se ralentir avec le temps ou devenir plus rapide.

Le repos absolu et le mouvement absolu ne sont que des conceptions de notre esprit : dans l'arrangement du monde, il n'y a rien d'absolu pour nous ; tout est relatif et conditionnel. Ainsi, toutes les choses qui nous paraissent les plus immobiles à la surface de la terre ne sont que dans un repos relatif. Les arbres sont en repos par rapport aux montagnes, et les montagnes sont en repos par rapport au sol et à la masse du globe; mais les arbres et les montagnes sont emportés avec nous dans le vaste orbite de notre planète, et tous ensemble nous parcourons en une seconde dix fois plus d'espace que n'en parcourt dans le même temps un boulet qui sort du canon. Cependant, en parcourant aussi vite les espaces du ciel, nous ne pouvons pas juger de notre mouve-

ment absolu, car il faudrait savoir si le soleil est immobile au centre du monde. Or, tout semble annoncer que le soleil emporte avec lui toutes les planètes, comme la terre emporte avec elle son atmosphère et ses nuages, ses arbres et ses montagnes. Le soleil lui-même n'est qu'une planète imperceptible, par rapport à un autre soleil autour duquel il tourne et cet autre soleil est sans doute emporté lui-même dans l'espace, sans qu'on puisse assigner ni même imaginer un centre fixe autour duquel toutes ces révolutions s'accomplissent.

7. *De l'Inertie.* — Il y a deux manières de concevoir les forces qui agissent sur la matière inorganique. On peut supposer qu'elles ont une existence séparée, qu'elles sont hors de la matière, et qu'elles en sont indépendantes ; ou bien on peut admettre qu'elles sont inhérentes à la matière elle-même, et qu'elles ne sont que des propriétés permanentes, qui lui ont été primitivement données. Ces deux suppositions reviennent au fond à une seule et même chose ; mais, quelle que soit l'idée qu'on puisse prendre de leur origine et de leur mode d'existence, il y a sur elles et sur la matière deux principes fondamentaux qui résultent de tous les phénomènes naturels qui se produisent à nos yeux, et qui se renouvellent ou se perpétuent depuis tant de siècles. Ces deux principes constituent ce qu'on appelle l'*inertie* de la matière. Le premier est que, toutes les forces qui agissent sur la matière cessant d'agir à un instant donné, la matière conserve son état de repos ou de mouvement. Le second est que toutes les forces sont soumises à des lois d'une infaillible stabilité. Il résulte du premier principe qu'un atome de matière ne peut ni se donner du mouvement ni altérer celui qu'il aurait reçu ; et si deux atomes de matière peuvent se donner du mouvement l'un à l'autre par leurs attractions, ou en général par leurs actions mutuelles, comme l'attraction de la terre donne du mouvement à une pierre qu'on abandonne à elle-même, il résulte du second principe

que ce mouvemment se produit suivant une loi déterminée qui n'a éprouvé aucun changement depuis que le monde existe. Ainsi, tous les changemens que subit la matière, soit dans son état, soit dans son repos, soit dans son mouvement, nous devons les attribuer à des causes ou à des forces particulières : tantôt à des forces nouvelles, qui surviennent tout à coup; tantôt à des forces permanentes, qui continuent d'agir et qui réglent leurs actions suivant les lois immuables auxquelles elles sont soumises. Si un corps se brise ou se déplace, s'il devient plus dur ou plus mou, s'il se refroidit ou s'il se réchauffe, s'il se liquéfie ou s'il se vaporise, c'est qu'une cause est survenue qui lui imprime ces modifications. Jamais une pierre ne s'est brisée d'elle-même, jamais elle ne s'est soulevée sur le sol, jamais on ne l'a vue ni se durcir, ni se ramollir, ni s'échauffer, ni se refroidir, ni se liquéfier d'elle-même, ni disparaître en vapeurs. Si l'on coupe le fil qui soutient un corps, on le voit qui tombe et qui se précipite d'un mouvement de plus en plus rapide. Il fallait une cause pour le faire tomber, et c'est cette même cause qui continue d'agir et qui presse son mouvement par ses actions répétées. La terre, dans son orbite autour du soleil, éprouve des variations perpétuelles : tantôt sa course devient plus lente, tantôt plus rapide, et cependant rien n'est accidentel dans ces périodes; rien n'est fortuit ni imprévu. C'est toujours la même cause qui préside à ces mouvemens ; mais c'est une cause qui change d'énergie, et c'est par la loi de ces changemens que se maintient l'équilibre du monde.

CHAPITRE II.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS.

Divisibilité. — Porosité.— Compressibilité.— Elasticité.— Dilatabilité.

8. On appelle propriétés générales des corps celles qui sont communes à tous les corps, solides, liquides ou gazeux. Celles de ces propriétés qu'il importe le plus de connaître dès le commencement de la physique sont :

1° La divisibilité ;
2° La porosité ;
3° La compressibilité ;
4° L'élasticité ;
5° La dilatabilité.

Nous remarquerons d'abord qu'elles dépendent de la structure des corps et de l'arrangement intérieur de leurs parties constituantes. Si les corps n'étaient pas composés, ils ne seraient pas divisibles, ni poreux, ni compressibles, et ils ne pourraient pas non plus avoir le ressort qui constitue l'élasticité, ni la faculté d'augmenter de volume qui constitue la dilatabilité. C'est pour cette raison qu'il ne serait pas exact de dire que ces propriétés sont des propriétés générales de la matière, car elles ne peuvent en aucune sorte appartenir aux atomes, tels que nous les pouvons comprendre et tels que nous les avons définis : ce sont des propriétés de l'ensemble, et non des propriétés des élémens.

9. *Divisibilité.* Tous les corps peuvent être divisés en plusieurs parties, et ces parties elles-mêmes en particules de plus en plus petites, jusqu'à ce qu'enfin elles échappent

à nos sens et à nos instrumens. Cette propriété, prise en général, est la chose du monde la plus connue : chacun sait que les barres de métal se rompent sous un certain effort, que les pierres se cassent sous le marteau, et que le diamant, qui est le plus dur et le plus inaltérable des corps que l'on connaisse, peut être lui-même réduit en fines poussières qui servent à polir sa surface. Mais ce qui doit nous occuper, et ce qui a dû surtout exciter la curiosité des plus anciens observateurs, c'est de savoir si tous les corps sont en effet divisibles, et s'ils le sont tous jusqu'au dernier degré de petitesse que nous puissions percevoir.

Pour les corps qui sont liquides comme l'eau, il est évident qu'ils peuvent être divisés et subdivisés en particules si petites, qu'elles soient à la fin tout ce que le toucher peut sentir de plus ténu et tout ce que l'œil peut voir de plus délié ; car en les regardant nous ne voyons sur leur surface aucune sorte d'inégalité, et en plongeant la main dans leur masse nous ne pouvons pas palper leurs molécules et les sentir distinctement, comme nous sentirions des parcelles de sable.

Pour les solides, nous ne pouvons pas juger aussi facilement de la grosseur ou de la ténuité des dernières parties qui les composent. Rien ne nous indique d'avance que parmi ces corps il ne s'en trouve pas qui, étant divisés jusqu'à une certaine limite, se refuseraient à une division ultérieure, et dont les parties élémentaires, encore grosses et palpables, ou du moins très perceptibles, ne pourraient plus être subdivisées davantage ni altérées en aucune manière. Aussi les anciens avaient eu grand soin d'expérimenter, dans cette vue, sur tous les corps qu'ils connaissaient ; et les modernes, qui ont tiré du sein de la terre tant de substances nouvelles, les ont de même éprouvées pour savoir jusqu'à quel point elles se divisent. Ce n'est qu'après toutes ces expériences qu'il a été permis de conclure que pour tous les corps connus il n'y a aucune limite percep-

tible à la divisibilité. Cependant, il ne serait pas rigoureux d'étendre cette conséquence à tous les corps qui existent : par cela seul qu'il a fallu l'expérience pour résoudre la question, la question n'est résolue rigoureusement que pour les corps sur lesquels on a expérimenté. Ainsi, il n'est pas absolument impossible que les volcans fassent sortir un jour des entrailles de la terre quelques substances dont les atomes soient pour nous d'une grandeur perceptible, et il n'est pas impossible non plus que de telles substances se trouvent dans la masse des autres planètes.

Sans reproduire ici toutes les expériences qui ont été faites sur les différens corps, nous citerons quelques exemples pour montrer, d'une part, que nos sens ne peuvent atteindre qu'à un certain degré de petitesse, et, d'une autre part, que ces dernières parcelles qui commencent à nous échapper sont encore composées d'un nombre immense de parties distinctes.

C'est par le sens du toucher et par celui de la vue que nous jugeons de la grandeur des objets ; le goût et l'odorat nous instruisent de leur présence, sans rien nous apprendre de leur forme ; et ce qui est une chose digne de remarque, c'est que, par le sens de l'ouïe, qui est chez les aveugles un instrument d'une si merveilleuse délicatesse pour juger des distances, nous ne pourrions jamais nous élever à l'idée d'une figure déterminée, ni à l'idée de la grandeur, ni à celle de la petitesse.

Le sens du toucher est répandu dans tout le corps, soit à l'intérieur, soit à la surface ; mais il s'exerce très-différemment dans les différentes parties. A l'intérieur, nous n'avons que des sensations vagues des corps étrangers qui nous touchent ou qui nous blessent ; et, dès que le contact est un peu prolongé, toute sensation locale disparaît ; nous n'éprouvons plus qu'un sentiment général, une manière d'être plus ou moins douloureuse, dont nous ne démêlons ni le siége ni la cause. C'est sans doute par une raison sem-

blable que nous ne sentons rien en dedans de nous-mêmes, ni les substances solides, comme les os, ni les substances liquides, comme le sang, même quand elles circulent avec une grande rapidité. A l'extérieur, tous les points de la surface peuvent sentir distinctement le contact des corps étrangers, mais c'est la main qui est le véritable organe du toucher ; on sait que c'est par elle que nous prenons l'idée des contours et des formes géométriques des corps, et que c'est par elle aussi que nous pouvons percevoir les objets les plus déliés. Sur une surface polie, la main exercée d'un aveugle peut sentir des grains de poussière d'une telle ténuité qu'il en faudrait des centaines rangées à côté l'un de l'autre pour faire la longueur d'une ligne. Une main moins délicate peut sentir distinctement un fil de laine ou un fil de soie d'un seul brin, et cependant ces fils n'ont pour l'ordinaire que les dimensions suivantes :

Diamètres en millimètres.

Laine ordinaire....	$0^{mm},05$	ou $\frac{5}{100}$	de millimètre.
Mérinos.....	$0^{mm},02$	.. $\frac{2}{100}$	....
Soie.....	$0^{mm},01$	.. $\frac{1}{100}$	....

La plupart des fourrures recherchées, comme le castor et l'hermine, ont une finesse qui est comprise entre le mérinos et la soie, et la plupart des laines de différentes espèces sont comprises entre le mérinos et la laine ordinaire. Ces filamens, qui ont une si grande finesse et qui sont à-peu-près les dernières grandeurs que le toucher puisse percevoir, sont cependant des corps très-composés ; chacun d'eux a une structure particulière que le sens de la vue peut seul nous faire connaître ; chacun d'eux contient des élémens très divers, qui sont préparés par la nutrition, sécrétés par les organes, et que la chimie peut séparer de nouveau et remettre en évidence.

Le verre, qui est un produit de l'art, et dans la composition duquel il entre plusieurs substances différentes, peut être filé comme la soie. Pour en faire l'expérience, on prend un tube de verre assez fin, on le présente vers le milieu de sa longueur à la flamme d'une bougie, et, quand il est chauffé dans cet endroit jusqu'au rouge-blanc, on tire les deux moitiés comme pour les séparer ; alors il se fait entre elles un fil d'une brasse de longueur, qui a toute la finesse de la soie, et qui en a presque la souplesse ; cependant ce filament de verre est encore assez épais pour former lui-même un tube ayant ses parois et son canal intérieur par lequel on peut faire passer des liquides.

Nous pourrions pousser bien plus loin les expériences sur notre sensibilité organique, si les corps ne devenaient pas trop flexibles à mesure qu'on les divise en filamens plus minces. Si, par exemple, un fil mille fois plus fin qu'un fil de soie pouvait avoir la rigidité d'une flèche, il serait curieux d'observer l'effet de ses piqûres sur les divers points de la peau ; on trouverait sans doute qu'une flèche de cette espèce pourrait nous traverser le corps de toutes parts, sans se faire sentir et sans troubler le moins du monde les fonctions de la vie.

Le poli que prennent les corps est une autre preuve de la divisibilité de la matière, et le contact des surfaces polies est une autre preuve de la limite des perceptions du toucher.

L'acier poli, les métaux, le diamant et les pierres précieuses ne sont pour la main qu'une seule et même chose ; en les touchant nous ne sentons qu'une surface géométrique, et cependant toutes ces superficies sont travaillées avec les fines poussières de l'émeri ou du diamant, et chaque grain de poussière y trace un sillon proportionné à sa grandeur ; voilà des cavités et des saillies que le toucher ne peut plus sentir.

Les dernières parcelles de matière qui échappent au toucher sont encore perceptibles à la vue. L'œil aperçoit sur

la pierre de touche les parcelles d'or qui servent à l'essai, et dont la main la plus délicate ne sentirait pas la présence. Les bulles de savon qui donnent de si brillantes couleurs sont de minces lames d'eau, dont Newton a mesuré l'épaisseur. Auprès de leur sommet elles n'ont ordinairement que $\frac{1}{10000}$ de millimètre, et elles se réduisent à $\frac{1}{100000}$ quand elles laissent voir une tache noire quelques instans avant d'éclater. Les ailes transparentes des insectes n'ont qu'une épaisseur à-peu-près pareille, et c'est pour cette raison qu'elles brillent du même éclat. Enfin les pellicules de verre que l'on souffle à la lampe ont aussi la même ténuité et les mêmes couleurs ; car c'est une loi générale que tous les corps transparens se colorent des plus vives nuances quand ils n'ont plus que quelques cent millièmes de millimètre d'épaisseur ; mais quand ils sont plus minces ils deviennent tout-à-fait invisibles. Une bulle de savon qui n'aurait que $\frac{1}{1000000}$ de millimètre d'épaisseur ne pourrait être aperçue par aucun moyen, lors même qu'elle aurait un pied de diamètre.

Pour les corps qui ne s'étendent pas en superficie, et qui ne sont grands que dans une seule dimension, comme les fils de métal ou les filamens organiques, il serait difficile d'assigner les limites de grandeur où l'on cesse de les voir nettement à l'œil nu. Ces limites dépendent de la perfection de l'organe et de l'éclat de la lumière ; mais au moyen de loupes et de microscopes il n'est pas besoin d'être fort exercé ni d'avoir un organe très-parfait pour apercevoir d'une manière distincte des fils qui n'ont de diamètre que quelques millièmes de millimètre.

On sait que dans les arts on emploie des fils de cuivre, de fer ou d'argent, qui sont aussi fins que des cheveux. La traction qu'on exerce pour les passer à la filière est ce qui limite leur finesse, parce qu'ils deviennent trop faibles pour y résister ; mais, par divers procédés ingénieux qui ne s'appliquent qu'à certains métaux, on parvient à faire des

fils qui sont plus fins que la soie. Le docteur Wollaston a fait des fils de platine qui n'avaient que $\frac{1}{1200}$ de millimètre d'épaisseur, c'est-à-dire qu'il faudrait plus de cent quarante de ces fils pour former un faisceau de la grosseur d'un fil de soie d'un seul brin. Quoique le platine soit le plus pesant de tous les corps connus, trois mille pieds de longueur d'un tel fil ne pèsent pas plus d'un grain. Pour arriver à ce résultat, qui paraît être le dernier terme que l'art puisse atteindre, le docteur Wollaston prend un fil de platine de $\frac{1}{100}$ de pouce anglais d'épaisseur, qu'il fixe dans l'axe d'un moule cylindrique de $\frac{1}{5}$ de pouce de diamètre; il remplit le moule d'argent en fusion, et il a ainsi un cylyndre d'argent dont l'axe est en platine. En le faisant passer à la filière, les deux métaux s'allongent également et conservent leurs rapports d'épaisseurs; enfin, quand le fil composé est à son plus grand degré de finesse, on le fait bouillir dans l'acide nitrique, qui dissout l'enveloppe d'argent, et qui met à nu le fil de platine.

Puisque la matière peut s'amincir en superficie comme dans les bulles de savon ou les lames de verre, et se rétrécir en longueur comme dans les fils de platine, il est évident qu'elle peut s'atténuer de la même manière dans toutes les dimensions. Ainsi, nous pouvons juger que toutes les parcelles que nous apercevons encore sont des parcelles très composées. Mais le règne organique nous en offre des preuves encore plus frappantes. On sait maintenant d'une manière certaine que le sang n'est pas un liquide uniforme tel qu'il paraît à la vue, et que sa substance se compose d'une foule de petits globules flottant dans un liquide particulier qu'on appelle le *sérum*. Cette découverte a été faite à-peu-près à la même époque en Italie par Malpighi, et en Hollande par Leenwenhoeck vers 1660, environ quarante ans après que Harvey eut démontré la circulation du sang. Ces globules sont sphériques dans le sang de l'homme et dans celui des mammifères, et ils sont allongés dans les

oiseaux et les poissons. Leurs dimensions varient suivant les espèces ; dans le callitriche d'Afrique, ils sont les plus gros que l'on ait observés, et s'élèvent à $\frac{1}{125}$ de millimètre ; dans la chèvre, ils sont les plus petits, et ne vont qu'à $\frac{1}{350}$. Les globules du sang de l'homme sont intermédiaires, et paraissent constamment de $\frac{1}{150}$ de millimètre. On peut calculer, d'après cette donnée, qu'il y en a près d'un million dans la goutte de sang d'un millimètre cube, qui pourrait être suspendue à la pointe d'une aiguille. Dans presque tous les autres mammifères, les dimensions des globules paraissent comprises entre les deux dernières limites. Ces globules ne sont pas des atomes, car ils peuvent être brisés par des actions chimiques, et ensuite ils peuvent être reconstruits ; et il n'y a aucun doute qu'ils ne donnent naissance à une multitude de parties distinctes quand ils passent dans la nutrition, car les fibres musculaires et celles des autres tissus se composent de globules très différens des globules du sang, et toujours beaucoup plus petits.

Enfin, il y a des animaux complets qui sont aussi petits que les globules du sang et que les plus petites choses perceptibles. Nous pouvons les voir et les étudier : mais c'est le dernier terme où la vue puisse atteindre ; ce qui est plus petit n'a plus de grandeur pour nos sens et n'a plus de mesure ; c'est le commencement de l'indéfini en petitesse où se jette notre pensée, et qu'elle poursuit indéfiniment sans trouver un point où elle se doive arrêter.

Au-delà de ce dernier terme de sensibilité organique, tout cependant n'est pas hypothèse et conjecture ; ces animalcules sont des êtres et des êtres essentiellement composés de parties ; ils sont organisés, puisqu'ils ont la vie et le mouvement ; ils sont pourvus de sens, puisqu'ils ont la force et l'instinct. Dans les fluides où ils vivent, ils exécutent, comme les poissons, des mouvemens rapides et variés ; ils se dirigent vers un but, ils évitent les obstacles, quelquefois même ils les surmontent ; enfin ils ont besoin

d'une proie, et ils savent la chercher et la saisir. Nous verrons en optique que, dans les dernières classes des êtres visibles, les mœurs ne sont pas moins curieuses à observer que dans les classes les plus apparentes ; mais dès à présent nous pouvons conclure que, dans le petit tout impalpable qui compose un individu de cette espèce, il y a des choses distinctes, des parties molles et des parties solides, des espèces d'articulations pour les mouvemens, et des espèces de canaux pour les fluides ; enfin que, parmi cette excessive petitesse, il y a une nutrition dans toutes les parties et une circulation nécessaires. Ainsi, le raisonnement poursuit encore la divisibilité de la matière, après que nos sens ne peuvent plus la constater ; et, comme l'ensemble des phénomènes de la chimie nous conduit à admettre l'existence des atomes, nous arrivons à cette conséquence définitive, que les atomes sont incomparablement plus petits que les dernières parcelles que nous pouvons saisir avec le sens le plus délicat aidé de l'instrument le plus parfait.

10. *Porosité.* — On appelle *pores* les intervalles qui se trouvent entre les diverses parties des corps. Les espèces de trous qu'on observe dans l'éponge ne sont autre chose que des pores d'une grande dimension ; les mailles plus serrées, qui composent son tissu, sont des pores un peu plus petits ; enfin, il se trouve encore, entre ces mailles et entre les fibres qui les composent, des interstices qu'on appelle aussi des pores, bien qu'ils soient d'une telle finesse qu'ils échappent à la vue. Ainsi, quand nous concevons une éponge d'un certain volume, d'un décimètre cube par exemple, nous pouvons par la pensée pénétrer dans sa structure intérieure, et distinguer, dans cette étendue totale, l'espace qui est occupé par les diverses fibres de l'éponge, et l'espace très irrégulier et très sinueux qui reste inoccupé ; nous devons même concevoir que chaque fibre, fût-elle fine comme un fil d'araignée, est elle-même composée de parties distinctes, et que ces parties sont encore séparées

les unes des autres comme les fibres le sont entre elles.

Le volume, qui n'est occupé que par la substance propre d'un corps, est ce qu'on nomme le *volume réel* : l'espace apparent, qui est limité par sa forme extérieure, est ce que l'on nomme le *volume apparent*. Ainsi le volume apparent, diminué du volume réel, est précisément le volume total de tous les pores pris ensemble. Quand on presse une éponge, son volume apparent se rapproche de plus en plus de son volume réel ; mais jamais on ne peut la presser au point de ne laisser aucun intervalle entre ses parties. Ainsi le volume réel est une chose que nous concevons très facilement, mais que nous ne pouvons jamais trouver : c'est pourquoi, quand nous parlons d'un volume, c'est toujours du volume apparent. Ce que nous disons de l'éponge s'applique à tous les corps, quelle que soit leur nature, car nous avons vu par la divisibilité que tous sont composés de parties séparables, et par conséquent de parties qui sont distantes les unes des autres ; ainsi, dans la réalité, tous les corps sont faits comme des éponges. L'acier et le diamant, qui sont les corps les plus durs ; l'or et le platine, qui sont les corps les plus compactes, ont aussi un volume apparent ; il faut de même pénétrer par la pensée dans l'intérieur de leur masse, et voir, entre les atomes qui les composent, des intervalles qui sont incomparablement plus grands que les atomes eux-mêmes.

En considérant la porosité dans ce sens le plus étendu, il est rigoureux de dire, comme on le dit d'ordinaire, que tous les corps sont poreux ; mais si l'on n'entend parler que de la porosité au travers de laquelle on peut faire passer des liquides ou des gaz, il n'est pas vrai que tous les corps soient poreux, car il y en a au travers desquels on ne peut faire passer aucun fluide, quelque subtil qu'il soit. C'est cette porosité qui donne passage aux corps étrangers, qu'il nous importe de connaître en ce moment, et nous allons faire voir par des exemples et par des expériences qu'il y a beau-

coup de corps, même des plus compactes, qui se laissent imbiber par les fluides.

Les tissus qui sont un produit de l'art, n'étant autre chose que des assemblages de fibres entrelacées, il n'est pas étonnant que ces fibres laissent entre elles des intervalles assez grands pour que les liquides puissent y pénétrer. Aussi le papier, les feutres et les étoffes sont des corps dont tout le monde connaît la porosité. Il en est de même des corps réduits en poudre ; ils sont toujours perméables aux fluides : c'est pour cela qu'un monceau de sable est humide jusqu'à son sommet, et c'est aussi pour cela que le feu se conserve sous la cendre, car si l'air n'arrivait pas jusqu'au charbon, il s'éteindrait à l'instant.

Les filtres dont on se sert dans les opérations des arts et dans les expériences de chimie ne sont autre chose que des corps poreux, dont les pores sont assez grands pour laisser passer les liquides, et assez petits pour arrêter tous les corps étrangers qu'ils tiennent en suspension.

Tous les tissus naturels, soit dans le règne végétal, soit dans le règne animal, sont aussi très poreux. Il n'est pas nécessaire de faire des expériences pour le prouver : il suffit de remarquer qu'une plante, un arbre ou un animal, n'était à son origine qu'un embryon d'un très petit volume, car tous les germes sont petits ; que ces corps se développent peu-à-peu ; qu'il n'y a rien d'inerte ou de mort dans leur masse, qu'ils vivent partout, aussi bien à l'intérieur qu'à la surface, et qu'il faut bien que des fluides puissent circuler entre toutes les fibres pour y porter la nourriture et y entretenir la vie.

On peut ajouter qu'il y a des canaux particuliers pour cette circulation des fluides dans les corps vivans, et que leur porosité est soumise à des lois régulières comme leur organisation. Sans doute, un animal ou un arbre ne sont pas l'ouvrage du hasard ; leurs parties matérielles ne sont pas entassées d'une manière confuse, comme les parcelles d'un

monceau de sable. Mais. ce n'est pas le hasard non plus qui a fait les minéraux et les montagnes : leurs parties matérielles ont aussi un certain ordre, et la porosité, dans un cas comme dans l'autre, résulte de l'arrangement nécessaire que les forces donnent à la matière.

Les corps organiques qui ont perdu la vie conservent encore cette disposition vasculaire ; seulement les divers fluides, n'étant plus soumis aux forces particulières qui les dirigeaient, s'infiltrent indistinctement à travers tous les pores qui se présentent ; tantôt ils s'exhalent, et le corps vivant se dessèche comme le bois ; tantôt ils restent confondus et donnent naissance à une fermentation qui les détruit.

Le bois qui est plongé dans l'eau augmente de poids et de volume ; celui qui reste dans l'air, soit dans les constructions, soit dans les ouvrages de menuiserie, se retire dans les temps secs et se gonfle dans les temps humides ; tous ces effets résultent de sa porosité, qui est très grande, et l'on ne peut y remédier que par des peintures ou des vernis.

Les animaux et les bois pétrifiés sont une preuve frappante de la porosité, puisque la substance qui les pétrifie doit s'infiltrer au travers de la masse et pénétrer toutes les fibres.

Les substances minérales sont plus ou moins poreuses, suivant leur nature et suivant l'arrangement de la matière qui les compose. Les pierres qui sont opaques et celles dont les parties sont très irrégulièrement arrangées, sont en général les plus poreuses.

La craie et toutes les pierres qu'on nomme calcaires sont de même nature que le marbre ; il n'y a de différence entre elles que dans l'arrangement des parties, et cela suffit pour que leur porosité soit très-différente. Lorsqu'on verse de l'eau sur un morceau de craie, elle est absorbée à l'instant et pénètre dans les pores ; celle qu'on verse sur un morceau de marbre reste à sa surface, et n'est point absorbée. De

même, si l'on jette un morceau de craie dans un verre d'eau, on voit une foule de petites bulles qui s'élèvent, et si l'on y jette un morceau de marbre, on n'aperçoit rien de semblable. Ces bulles proviennent de l'air qui remplissait les pores de la craie, et que l'eau en chasse à mesure qu'elle y pénètre. Si on en veut la preuve, il suffit de briser le morceau de craie qui a séjourné dans l'eau; on le trouve mouillé jusqu'au centre, tandis que le morceau de marbre est à peine mouillé au-dessous de sa surface. Ce n'est pas que le marbre ne puisse aussi à la longue s'imbiber d'eau; mais pour faire passer les liquides dans les corps qui ne sont guère poreux, il faut en général deux conditions, beaucoup de temps et beaucoup de pression; c'est pourquoi les pierres qu'on tire du fond des rivières ou du fond de la mer sont en général très-humides, surtout si elles viennent d'une grande profondeur; car nous verrons qu'à trois ou quatre mille mètres au-dessous de la surface de l'eau les corps sont pressés par le poids supérieur du liquide, comme ils le seraient sous une très forte presse.

Parmi les pierres siliceuses, comme les agathes et les pierres à fusil, il s'en trouve une qu'on appelle *hydrophane*, dont la porosité se manifeste par un singulier phénomène. L'expérience en est curieuse; l'hydrophane, dans son état ordinaire, est demi-transparente; on la plonge un instant dans l'eau, et quand on l'en retire elle est presque aussi transparente que le verre. L'eau a pénétré sa masse comme l'huile pénètre le papier; les bulles d'air qui se dégagent, comme dans l'expérience de la craie, montrent le progrès de l'absorption : leur volume total est égal à celui des pores accessibles à l'eau; mais, si on veut avoir ce volume avec plus d'exactitude, il suffit de peser l'hydrophane avant et après l'opération : la différence des poids sera le poids de l'eau absorbée, et il sera facile d'en conclure le volume.

Il y a beaucoup de phénomènes naturels par lesquels nous pouvons juger que les grandes masses minérales n'ont pas

moins de porosité que les petites masses sur lesquelles nous pouvons expérimenter ; on sait, par exemple, que dans les grottes les plus profondes, l'eau s'infiltre à travers les parois, et que c'est ainsi qu'elle vient déposer de toutes parts les stalactites, les stalagmites et toutes les autres cristallisations dont l'assemblage offre un spectacle si surprenant. On sait pareillement que les montagnes taillées à pic éprouvent chaque année une sorte d'exfoliation, dont la porosité est une des causes essentielles. Leurs flancs s'imbibent d'humidité, quand ils sont battus par la pluie ou par les vents humides, le froid de l'hiver congèle cette eau et augmente son volume ; il en résulte une rupture d'adhérence dans toutes les couches superficielles, et, quand vient le printemps, tous ces petits feuillets se détachent peu-à-peu et tombent jusqu'à l'automne. C'est ainsi qu'au pied des grands escarpemens, s'entassent des couches à-peu-près de même épaisseur, dont on peut se servir en géologie pour remonter aux temps primitifs où les montagnes ont pris la disposition qu'elles conservent aujourd'hui.

Enfin, les métaux eux-mêmes donnent des preuves sensibles de porosité. Une boule d'or, remplie d'eau et soumise à une grande pression, laisse apercevoir, sur tous les points de sa surface, des gouttelettes semblables à celles de la rosée. Cette expérience fut faite, pour la première fois, en 1661, par les académiciens de Florence; elle a été, depuis, très souvent répétée avec des métaux différens, et toujours avec le même succès.

Il résulte de ces divers exemples de porosité qu'un grand nombre de corps sont assez poreux pour se laisser pénétrer par les fluides, dès qu'ils sont en contact avec eux ; qu'il y en a d'autres qui ne se laissent pénétrer qu'après un temps plus ou moins long, et sous une pression plus ou moins forte; enfin, qu'il s'en trouve, comme le verre, qui se laisseraient briser plutôt que de se laisser pénétrer. Il est à peine nécessaire de faire remarquer que tous les fluides ne sont pas

également subtils pour pénétrer les corps : l'eau, l'alcool, l'éther, les diverses solutions acides ou alcalines, le mercure, l'huile, le soufre fondu, l'air et les différens gaz, ne peuvent pas s'insinuer avec la même facilité entre les interstices des corps. Il est très heureux, pour les expériences, que le verre soit absolument imperméable à tous les fluides.

11. *Compressibilité.* — La compressibilité est la propriété qu'ont les corps de se réduire à un moindre volume apparent lorsqu'on les presse de toutes parts.

On sait que les tissus très poreux sont en même temps très compressibles; l'éponge peut être réduite au tiers, au quart, ou même au dixième de son volume apparent. Le papier, les étoffes, le bois et tous les tissus qui se laissent pénétrer par les fluides peuvent pareillement diminuer de volume, et perdre par la compression les fluides qu'ils contiennent. Il y a une foule de procédés des arts qui ne sont que des applications de ce principe.

Les pierres elles-mêmes, quand elles sont chargées d'un grand poids, se laissent comprimer jusqu'à un certain point. Les bases des édifices et des colonnes qui en soutiennent la charge en donnent des preuves très-évidentes.

Les métaux sont *écrouis* par la percussion; ils deviennent plus compactes; leurs parties se refoulent les unes sur les autres, et forment une masse plus serrée.

Les monnaies et les médailles reçoivent leurs empreintes sous l'action d'un balancier qui les frappe subitement; cette pression est si forte qu'elle façonne le métal comme la pression de la main pourrait façonner la cire; et non seulement ils changent de forme, pour se mouler sur les traits les plus déliés de l'effigie que porte le coin, mais encore ils se compriment de telle sorte, que la pièce frappée a sensiblement moins de volume que celle qui ne l'est pas.

Les liquides sont en général beaucoup moins compressibles que les solides : l'eau ne diminue que très peu de

volume, quand on l'enferme dans une pièce de canon dont les parois ont plus de trois pouces d'épaisseur, et qu'on la comprime par les plus fortes puissances. Le métal éclate avant qu'elle ne soit réduite aux $\frac{19}{20}$ de son volume. Car nous verrons dans l'un des livres suivans qu'elle ne se comprime que de $\frac{45}{1000000}$ pour chaque atmosphère, et qu'il ne faut pas mille atmosphères pour faire éclater un cylindre de bronze de trois pouces d'épaisseur.

L'air et les gaz sont de tous les corps ceux qui se composent le plus facilement, et ceux qui se réduisent à un moindre volume. On peut le démontrer par un grand nombre d'expériences; mais l'une des plus simples est celle du briquet-à-air. Cet appareil se compose d'un tube de verre de huit ou dix pouces de longueur, et dont les parois sont très épaisses (*Fig.* 1); dans son intérieur, qui est parfaitement cylindrique, se meut un piston qui le ferme exactement, dans toutes les positions qu'il peut prendre. Si le tube était rempli d'eau, le piston ne pourrait pas descendre, puisque l'eau est très peu compressible; mais, quand il est rempli d'air, la force de la main est suffisante pour enfoncer le piston et pour réduire le volume au quart ou au cinquième de ce qu'il était d'abord. On sent que la résistance augmente à mesure que l'espace diminue, et qu'elle augmente de plus en plus; mais, quelque effort que l'on puisse faire, on ne parviendrait jamais à pousser le piston jusqu'au fond, puisqu'il faudrait pour cela que l'air perdît de son impénétrabilité, c'est-à-dire qu'il fût anéanti. Quand le piston reprend sa position primitive, l'air aussi reprend son volume primitif; ainsi il n'est pas compressible à la manière des métaux, qui reçoivent des empreintes, et qui ne reviennent pas à leur volume primitif quand le balancier cesse de les presser.

Les autres gaz ont la même propriété que l'air, et tous ces corps ne sont pas seulement propres à être comprimés, mais, en vertu de leur force expansive, ils sont propres à prendre un volume beaucoup plus grand.

Si au-dessus du briquet-à-air on ajoutait un tube de même diamètre, et qu'au lieu d'enfoncer le piston on le soulevât dans ce nouveau tube, l'air intérieur se répandrait partout et prendrait un volume dix fois, cent fois, mille fois, etc., plus grand; et même il ne paraît pas qu'il y ait de limite à cette expansion des gaz. Après cela, on pourrait de nouveau enfoncer le piston, et le volume se réduirait de plus en plus; on pourrait le soulever de nouveau et le réduire encore, et ainsi de suite, sans que l'air conservât la moindre trace des divers états de compression ou d'expansion par lesquels on l'aurait fait passer. C'est une constitution très remarquable que celle de ces corps qui peuvent prendre ainsi un volume cent mille fois plus grand ou cent mille fois plus petit, sans qu'une action mutuelle entre leurs molécules cesse de s'exercer.

D'après cela, on pensera peut-être que tout l'air de l'atmosphère pourrait être enfermé dans un très petit espace, comme par exemple dans la capacité d'une outre; mais nous verrons que, s'il n'y a pas de limite à l'expansion, il y a une limite nécessaire à la compression et à la réduction de volume.

12. *Élasticité.* — L'élasticité est la propriété qu'ont les corps de reprendre leur état primitif, quand on fait cesser la cause qui changeait leur forme ou leur volume.

L'air est parfaitement élastique : car si l'on presse une vessie à moitié pleine d'air, elle reprend toujours son état, dès qu'on cesse de la presser : pareillement, quand on a enfoncé le piston du briquet-à-air, il remonte de lui-même; l'air comprimé le soulève malgré le frottement, et le ramène vers le point de départ. Il en est toujours ainsi quand une cause quelconque agit sur un gaz; dès qu'elle cesse d'agir, le gaz revient exactement comme il était auparavant. C'est pour cela que les gaz s'appellent des *fluides élastiques*.

Les liquides qui ont été comprimés paraissent ne rien conserver non plus des pressions qu'ils ont supportées; ils

reprennent leur volume à l'instant même où cesse l'action des causes comprimantes.

Il n'y a pas de corps solide qui soit aussi parfaitement élastique, que les gaz et les liquides. Le caoutchouc, ou gomme élastique, est peut-être de tous celui qui a le plus d'élasticité; et cependant, soit par la chaleur, soit par de grandes compressions long-temps prolongées ou souvent répétées, on finit par changer sa forme ou son volume.

Quoique imparfaite, l'élasticité des solides n'en est pas moins une propriété très importante; nous l'examinerons fort en détail dans l'un des livres suivans. Ici nous nous contenterons de faire voir, par quelques expériences, qu'elle se manifeste à divers degrés dans les différens corps.

L'élasticité de l'ivoire est assez indiquée par les mouvemens singuliers des billes de billard, mais elle se montre encore d'une manière plus directe par l'expérience suivante : on laisse tomber une bille ordinaire, ou une bille grosse seulement comme une balle, sur un plan très uni, où l'on a passé une légère couche d'huile; à l'instant elle se relève et rebondit jusqu'à la hauteur du point de départ, ou à très peu près. C'est là sans doute une preuve suffisante de son élasticité, et par conséquent de son changement de forme; mais, si l'on regarde sur le plan, au point où elle a frappé, on y voit une empreinte d'autant plus large que le choc a été plus vif, ce qui prouve d'une manière certaine que la bille ne s'est relevée qu'après s'être aplatie comme ferait une vessie pleine d'air ou une bulle de savon, car ces bulles si légères peuvent aussi se réfléchir contre les corps et jaillir sans se rompre. Des balles de bois, de pierre, de verre ou de métal, se comportent à-peu-près comme les billes d'ivoire : toutes s'aplatissent plus ou moins avant de se relever, ce qui est une preuve de leur compressibilité; et toutes, quand elles n'ont pas été comprimées trop vivement, rebondissent et reprennent leur forme première, ce qui est une preuve de leur élasticité. Ainsi, dans le jeu des corps élastiques il y a un double phénomène,

celui de la compression ou du changement de forme et celui du rétablissement complet de toutes les parties. Une feuille de papier, ou même une feuille de plomb, ne sont pas des corps sans élasticité; car on peut leur donner de légères flexions, sans qu'elles se rompent et sans qu'elles cessent de reprendre leur position : mais, si on les écarte un peu trop, leur élasticité est forcée, elles prennent le nouveau pli, et ne font plus d'effort pour en revenir.

L'élasticité résultant toujours d'un dérangement des molécules, soit qu'il ait lieu par pression ou par flexion, soit qu'il ait lieu par torsion ou par traction, l'on juge aisément qu'il y a, pour chaque corps, des limites à ces dérangemens, et par conséquent des limites à l'élasticité. Les corps sont d'autant plus élastiques que ces limites sont plus étendues : ainsi les billes d'ivoire sont plus élastiques que les balles de plomb, car elles reviennent d'une compression plus grande; les lames d'acier plus que celles de verre, car elles peuvent être bien plus fléchies; les fils de soie plus que ceux de cuivre ou d'argent, car ils peuvent être tordus bien davantage; et les cordes de violon plus que les fils de fer, car elles peuvent être bien plus étirées sans cesser de revenir à leur première longueur. Mais, si l'on ne fait éprouver aux molécules d'un corps que le dérangement que son état d'agrégation peut permettre, elles reviennent toujours très exactement à leur position, et, dans ce sens, on pourrait dire que tous les corps sans exception sont doués d'une élasticité parfaite.

13. *Dilatabilité.* — La dilatabilité est la propriété qu'ont les corps de changer de volume par l'influence de la chaleur, de s'agrandir quand on les chauffe, de se contracter quand on les refroidit, et de reprendre exactement les mêmes dimensions quand on les ramène exactement au même degré de chaud ou de froid.

L'air se dilate si facilement que la simple chaleur de la main augmente de beaucoup son volume. Pour en faire

l'expérience, on prend un tube de verre très long, d'un diamètre intérieur de deux ou trois millimètres, et à l'extrémité duquel on a soufflé une boule. On peut, au moyen de certaines précautions, y faire entrer une colonne de liquide coloré qui se tienne vers le milieu de la longueur du tube en *m* (*fig.* 2) et qui sépare l'air intérieur de l'air extérieur. Cela fait, quand cette colonne est en repos, on approche la main près de la boule, et à l'instant on voit monter la colonne liquide; donc, l'air intérieur augmente de volume. Ensuite, en retirant la main, on voit la colonne qui retombe peu-à-peu et qui revient enfin à sa première position; ce qui prouve qu'en reprenant le même degré de chaleur, l'air reprend aussi le même volume.

Pour faire la même expérience sur les liquides, on prend un tube semblable au précédent, que l'on remplit d'eau ou de mercure jusqu'au milieu de sa longueur en *m* (*fig.* 3); ensuite on plonge la boule dans de l'eau chaude, et la colonne monte de plus en plus jusqu'en *m'*: au contraire, si on la plonge dans de la glace pilée, la colonne tombe en *m''*; et elle retourne encore à sa position primitive quand on la replace dans l'air, comme elle était d'abord.

Pour les solides, l'expérience peut se faire de plusieurs manières : une des plus simples consiste à prendre une barre de métal qui s'ajuste très exactement entre deux talons métalliques, dressés à angle droit (*fig.* 4) sur une plaque de bois assez épaisse. Si l'on fait rougir la barre, elle devient trop longue pour reprendre sa place, mais elle revient sur elle-même à mesure qu'elle se refroidit; et enfin, quand elle n'a plus que la chaleur qu'elle avait d'abord, elle a repris sa longueur primitive, et retombe entre les points fixes.

Ainsi, tous les corps sont dilatables, et, de tout ce qui peut changer en eux, leur volume est la chose la plus changeante. A chaque instant du jour ou de la nuit la chaleur varie, soit par l'action du soleil, soit par une foule d'autres causes, et tous les corps qui sont à la surface de

la terre participent à ces variations; ils sont tour-à-tour plus dilatés ou plus contractés, et n'ont jamais les dimensions fixes que nous leur supposons. C'est par un mouvement de toutes les parties de l'intérieur et de l'extérieur que se produisent ces alternatives, et, si la porosité nous fait voir que ces parties ne se touchent pas, la dilatation nous fait voir maintenant qu'elles ne sont jamais en repos et qu'elles ne gardent jamais ni les mêmes distances ni les mêmes positions relatives. D'où nous pouvons conclure, enfin, que la matière qui nous semble la plus inerte a une activité perpétuelle dans toute l'étendue de sa masse, parce que toutes ses molécules, soit au-dehors soit au-dedans, sont soumises à des causes qui agissent sans cesse, et qui peuvent sans cesse éprouver des changemens d'intensité.

CHAPITRE III.

DE L'ÉQUILIBRE ET DU MOUVEMENT.

Notions de Statique.

14. Un corps est en *équilibre* quand les forces qui le sollicitent se détruisent mutuellement ou quand elles sont détruites par quelque résistance. Ainsi, un corps est en équilibre à l'extrémité du fil qui le suspend, parce que la pesanteur qui le sollicite est détruite par la résistance du fil et par celle du point de suspension : si le fil n'est pas assez résistant, il se rompt et le corps tombe; si le point d'attache est mal assuré, le corps l'entraîne et tombe avec lui. Quelquefois l'équilibre a lieu sans point fixe et sans résistance apparente : les poissons les plus pesans sont en équilibre dans l'eau; un ballon avec ses agrès, sa nacelle, et les observateurs qu'il emporte, peut aussi être en équilibre dans les airs : mais alors la pesanteur qui sollicite ces corps est exactement détruite par des pressions particulières, comme nous le verrons dans un des chapitres suivans.

On peut dire que tous les corps qui nous paraissent en repos ne sont en effet que des corps en équilibre, parce qu'ils sont toujours soumis à l'action de plusieurs forces qui se détruisent mutuellement.

La *Statique* a pour objet de déterminer les conditions de l'équilibre, et la *Dynamique* a pour objet de déterminer les lois des mouvemens qui se produisent quand les conditions d'équilibre ne sont pas remplies. La *Mécanique* comprend la Statique et la Dynamique, c'est-à-dire les lois de l'équilibre et celles du mouvement.

15. On ne peut mesurer les forces qu'en prenant pour unité une force convenue, comme on mesure les longueurs ou les poids en prenant pour unité une longueur ou un poids déterminés. De plus, la notion de grandeur ne s'appliquant pas directement aux forces, il faut définir avec précision ce qu'on appelle *forces égales*, *forces doubles*, etc.

Pour que deux forces soient égales, il faut qu'elles se fassent équilibre, lorsqu'on les oppose l'une à l'autre, sur un point, ou aux extrémités d'une droite inflexible. Deux forces égales donnent une force double quand on les ajoute, c'est-à-dire quand on les fait agir dans le même sens et dans la même direction; on aurait une force triple, si l'on faisait agir dans le même sens trois forces égales, et ainsi de suite.

D'après cela, si l'on convient de représenter une force par un nombre ou par une ligne, la force double de celle-là sera représentée par un nombre double ou par une ligne double, etc. C'est ainsi que nous pouvons toujours représenter les forces par des grandeurs numériques ou linéaires, et faire sur elles les mêmes opérations que nous faisons sur ces grandeurs.

16. Quel que soit le nombre des forces qui agissent sur un point, et quelles que soient leurs directions, elles ne peuvent, en dernier résultat, imprimer à ce point qu'un seul mouvement dans une direction déterminée. Or, on conçoit qu'il existe une certaine force qui serait, à elle seule, capable de produire le même effet; et cette force unique, qui pourrait remplacer l'ensemble de toutes les autres, est ce qu'on appelle leur *résultante*. Ainsi, quand un bateau se meut à la fois par la force du courant, par la force des rames et par celle du vent, on peut concevoir une force unique, un fil assez fort, par exemple, qui, étant attaché au bateau, serait tiré dans une telle direction et avec un tel effort qu'à lui seul il lui imprimât à chaque instant le même mouvement que toutes ces forces réunies; il en serait la résultante. Le courant, le vent et les rames cessant d'agir, et le fil dont

nous parlons leur étant substitué, rien ne serait changé quant au résultat.

L'ensemble des forces qui concourent à produire un effet se nomme *un système de forces ;* ces forces s'appellent aussi des *composantes*, quand on les considère par rapport à la *résultante* qui pourrait les remplacer. Il est évident que, si à un système de forces on ajoutait une force nouvelle qui fût égale à la résultante et dirigée en sens contraire, l'équilibre aurait lieu dans ce nouveau système de forces. C'est là la propriété caractéristique de la résultante.

Ainsi, dans l'exemple que nous avons choisi, tandis que les forces du courant, du vent et des rames, exercent leur action, si l'on ajoutait un fil assez résistant, dirigé en sens contraire de celui qui représente la résultante et tiré avec le même effort, cette nouvelle force produirait l'équilibre : le bateau serait plus fixe que s'il était à l'ancre ; il ne pourrait avancer ni reculer, ni se mouvoir d'aucun côté, jusqu'à ce qu'il arrivât quelque force nouvelle ou quelque changement dans les forces agissantes pour déranger l'effort par lequel elles se détruisent.

17. *Résultante de plusieurs forces qui agissent dans la même direction.* — Quand toutes les forces qui agissent sur un point tendent à le mouvoir sur une même ligne, il peut se présenter deux cas : 1° si toutes ces forces agissent dans le même sens, la résultante est égale à leur somme; 2° si elles agissent les unes dans un sens et les autres dans le sens opposé, la résultante est égale à la différence des deux résultantes partielles et agit dans le sens de la plus grande.

18. *Résultante de deux forces qui agissent angulairement sur un même point.* — Deux forces agissent sur le point a (*fig.* 5), l'une dans la direction ax, et l'autre dans la direction ay; la première est représentée en grandeur par ab, et la deuxième par ac : il est clair que le point a ne peut se mouvoir, ni suivant ab, ni suivant ac, et qu'il doit prendre une direction intermédiaire. C'est ce que le bon

sens nous indique d'abord, mais c'est à-peu-près tout ce qu'il peut nous faire voir ; car, pour déterminer et cette direction moyenne que doit prendre la résultante et l'intensité qu'elle doit avoir par rapport aux composantes, il faut recourir à des considérations que nous devons supprimer ici. Nous nous contenterons d'énoncer le principe général de la *composition des forces*, parce qu'il est très simple et très facile à comprendre. Voici en quoi il consiste : on construit le parallélogramme *abrc* sur les grandeurs des deux forces données et l'on mène la diagonale *ar* ; cette diagonale représente à la fois la *grandeur* et la *direction* de la résultante. Ainsi, le point *a*, sollicité par les deux forces *ab* et *ac*, est exactement dans le même cas que s'il était sollicité par une seule force qui serait dirigée suivant *az* et qui aurait une grandeur égale à *ar*. Ce principe est vrai pour les forces égales comme pour les forces inégales ; pour celles qui font un angle aigu, droit ou obtus, comme pour celles qui font un angle quelconque : c'est le principe fondamental de toute la statique, il est connu sous le nom de *parallélogramme des forces*.

Quand les deux forces sont égales, la résultante divise toujours leur angle en deux parties égales, mais, pour sa grandeur, elle est tantôt égale à celle des composantes, tantôt plus grande et tantôt plus petite (*fig.* 6, 7 et 8).

Quand les deux forces sont inégales, la résultante divise leur angle en deux parties inégales, et elle est toujours plus rapprochée de la force la plus grande (*fig.* 9).

19. Puisque deux forces peuvent être remplacées par une seule, réciproquement une seule force peut être remplacée par deux autres ; on voit même qu'il y a une infinité de systèmes différens qui peuvent donner lieu à la même résultante (*fig.* 10), et que, réciproquement, il y a une infinité de manières de remplacer une seule force par le système des deux autres, quand on n'exige rien ni sur leur grandeur ni sur leur direction : mais, si l'on demande, par *ex.* (*fig.* 11),

de remplacer la force *ar* par deux autres forces, dont l'une soit dirigée suivant *ay*, et soit d'une grandeur *ac*, alors le problème est déterminé, parce qu'il n'y a plus qu'une manière d'achever le parallélogramme et de trouver la composante *ab*.

20. *Résultante d'un nombre quelconque de forces agissant au même point.* — Quand on sait trouver la résultante de deux forces qui agissent au même point, on trouve aisément la résultante d'un nombre quelconque de forces ; car on prend la résultante des deux premières, puis la résultante de cette résultante et de la troisième force, puis celle aussi de cette nouvelle résultante et de la quatrième force, et ainsi de suite, en commençant à volonté par l'une ou par l'autre (*fig.* 12).

21. *Résultante des forces parallèles.* — Quand deux forces parallèles *ab* et *cd* (*fig.* 13) agissent sur une ligne *ac*, elles peuvent aussi être remplacées par une force unique qui est leur résultante, et dont on trouve l'intensité, la direction et le point d'application, par les principes suivans :

1°. La résultante des deux forces parallèles est égale à leur somme quand elles agissent dans le même sens, et à leur différence quand elles agissent en sens contraire.

2°. Elle est parallèle aux composantes.

3°. Elle est appliquée en un point *g*, tel que les distances *ag* et *cg* soient en raison inverse des forces *ab* et *cd*. Ce point d'application de la résultante s'appelle le *centre des forces parallèles*. Une propriété remarquable de ce point, c'est qu'il reste le même quand les forces changent de direction absolue, en conservant leur parallélisme, car, si les mêmes forces agissaient suivant *am* et suivant *cn*, leur résultante passerait encore par le point *g*, puisque, les forces n'ayant point changé d'intensité, leurs grandeurs seraient encore en raison inverse des distances *ag* et *cg*.

La résultante d'un nombre quelconque de forces parallèles se trouve : en composant d'abord les deux premières, puis leur résultante avec la troisième, et ainsi de suite.

22. *Des Couples.* — Deux forces égales, parallèles et opposées, agissant angulairement sur une ligne *ac* (*fig.* 14), forment ce qu'on appelle un *couple.* D'après ce que nous venons de dire, la résultante d'un couple est égale à *zéro*, et cependant le système n'est pas en équilibre ; c'est un des cas très particuliers où deux forces ne peuvent pas être remplacées par une seule. Un couple peut bien être transformé en un autre couple, on peut même le transformer d'une infinité de manières, mais jamais on ne peut le remplacer par une force unique ; et par conséquent, pour un couple, il n'y a jamais de condition d'équilibre : si on le laisse agir, il fait tourner la ligne *ac* jusqu'à ce qu'il se soit déployé dans la longueur *dcab* (*fig.* 15) ; alors il n'y a plus de couple, et l'équilibre est stable : si l'on avait reployé le couple dans la position marquée (*fig.* 16), il y aurait aussi équilibre, mais équilibre instable, car, en le déployant un peu, il ferait tourner la ligne et se déploierait tout-à-fait.

23. *Levier.* — On appelle *levier* une barre droite ou courbe qui peut tourner autour d'un point fixe, qu'on appelle *point d'appui.*

Un levier ne peut jamais être en équilibre sous l'action d'une seule force, à moins que le prolongement de cette force ne passe par le point fixe.

Un levier étant sollicité par deux forces situées dans le même plan, il y a deux conditions pour qu'il reste en équilibre : *il faut, premièrement, que ces forces tendent à faire tourner en sens contraire; et, secondement, que leurs intensités respectives soient en raison inverse de leurs bras de levier.* On appelle *bras de levier d'une force* la longueur de la perpendiculaire abaissée du point d'appui sur la direction de cette force ou sur son prolongement : ainsi *fp* (*fig.* 22) est le bras de levier de la force *ab*, et *fq* celui de la force *dc*. Ces deux forces étant supposées dans le même plan, on voit qu'elles tendent à faire tourner en sens contraires et qu'elles remplissent la première condition ; mais, pour

qu'elles remplissent aussi la seconde, il faut *que la première force contienne la seconde autant de fois que le bras de levier de la seconde contient le bras de levier de la première.* Si, par exemple, *ab* est double de *cd*, il faudra que *fq* soit double de *fp* ; si *ab* était mille fois *cd*, il faudrait que *fq* fût mille fois *fp*. Ces conditions d'équilibre s'appliquent à un grand nombre de machines, qui ne sont, en dernier résultat, que des systèmes de levier plus ou moins compliqués : dans le treuil et le cabestan, par ex. (*fig.* 19 et 20), la résistance *r* et la puissance tangentielle *p* qui tend à la vaincre sont entre elles en raison inverse de leurs bras de leviers, ou du rayon *ab* du cylindre et du rayon *cd* de la roue.

24. *Pression sur le point d'appui.* — Dans l'équilibre du levier, le point fixe supporte une certaine pression qu'il est utile de connaître. Pour cela, il suffit de transporter les forces au point de rencontre de leurs directions prolongées (*fig.* 23), et de chercher leur résultante par la règle du parallélogramme des forces ; cette résultante passe par le point d'appui, et exprime par conséquent la grandeur et la direction de la pression qu'il supporte. Si les forces étaient parallèles (*fig.* 24), on sait que la résultante serait parallèle aux composantes et égale à leur somme.

25. Dans l'usage ordinaire, on emploie le levier à soulever des fardeaux : alors l'une des deux forces s'appelle la *résistance*, c'est le fardeau que l'on veut soulever ; l'autre s'appelle *la puissance*, c'est la force quelconque qui est mise en jeu pour soulever le fardeau. Dans ce cas, la condition d'équilibre s'exprime en ces termes : *La puissance et la résistance sont en raison inverse de leurs bras de levier.*

On distingue aussi trois sortes de levier, suivant les positions relatives du point d'appui *a* et des points d'application de la puissance *p* et de la résistance *r* (*fig.* 21) : dans *le levier du premier genre*, le point d'appui est entre la puissance et la résistance, la balance est un levier de cette espèce; dans celui

du *deuxième genre*, la résistance est entre le point d'appui et la puissance ; dans celui du *troisième genre*, la puissance, au contraire, tombe entre la résistance et le point d'appui.

Nous renvoyons, pour de plus amples détails, à la Mécanique de M. Poisson et à la Statique de M. Poinsot.

26. *Mouvement uniforme.* — Le mouvement uniforme est celui dans lequel le mobile parcourt des espaces égaux en temps égaux. Ainsi, concevons un mobile qui parcourt une ligne droite, et une horloge qui mesure le temps : si, dans chaque minute, le mobile avance de la même longueur, de soixante pieds par exemple, et dans chaque demi-minute de trente pieds, de vingt dans chaque tiers de minute, il se mouvra d'un mouvement uniforme. Puisque les espaces sont égaux pour des temps égaux, il en résulte que le rapport de l'espace au temps est une quantité constante : c'est ce rapport qui s'appelle *la vitesse* du mouvement uniforme. Quand on prend un temps double ou triple, l'espace est double ou triple, et le rapport ne change pas. Le nombre qui représente la vitesse dépend des unités qu'on a choisies pour l'espace et pour le temps, et ce serait mal exprimer la vitesse que de l'exprimer par un nombre, sans désigner les unités qui ont servi à trouver ce nombre. Les mouvemens uniformes sont plus lents ou plus rapides, suivant que leur vitesse est plus petite ou plus grande : le vent ordinaire ne parcourt que 60 mètres en une minute, le vent des orages parcourt jusqu'à 2700 mètres ; ce dernier mouvement est donc 45 fois plus rapide que le premier.

27. Puisque la matière est inerte, un corps qui est animé d'un mouvement uniforme doit se mouvoir perpétuellement dans la même direction et avec la même vitesse, à moins qu'une autre force ne vienne agir sur lui, soit pour changer sa direction seulement, soit pour changer à la fois sa direction et sa vitesse ; car, de lui-même, un corps ne peut rien changer, ni à son état de repos ni à son état de mouvement. C'est ainsi qu'il faut entendre l'inertie, et non pas comme

l'entendaient d'anciens philosophes, qui voulaient à toute force que la matière eût un penchant pour le repos. Ils comparaient les corps à des hommes paresseux : ceux-ci, disaient-ils, cherchent le repos, ils ont horreur du travail ; de même, la matière a horreur du mouvement, elle se hâte d'entrer en repos dès qu'on cesse de la pousser ; ainsi, pour eux, inertie signifiait à-peu-près la même chose que paresse. Mais, l'on voit, d'après ce que nous avons dit, que trois choses essentielles constituent l'inertie : 1° la nécessité d'une force pour donner du mouvement à la matière, 2° la permanence du mouvement quand la force a cessé d'agir, 3° la nécessité d'une force nouvelle pour changer le mouvement qu'elle a reçu.

Lorsque nous voyons un mouvement qui diminue, qui cesse ou qui change d'une manière quelconque, nous pouvons être assurés qu'il y a quelques causes à ces changemens : une pierre que nous lançons contre le soleil devrait aller jusqu'au soleil, si elle n'était arrêtée par la résistance de l'air et par la pesanteur qui la rappelle vers la terre; une bille de billard, une fois mise en mouvement, roulerait d'une bande à l'autre sans jamais s'arrêter, si elle n'éprouvait aussi la résistance de l'air et un frottement plus ou moins considérable sur les filamens du tapis.

28. La plupart des forces qui mettent les corps en mouvement n'agissent d'une manière directe que sur un petit nombre de molécules qui composent les corps. Ainsi, quand on choque une bille de billard, on ne touche que quelques points de sa surface; quand le vent pousse un vaisseau, il ne presse que les voiles; et quand la poudre lance un boulet, les gaz qui se développent et qui donnent l'impulsion ne touchent et ne pressent que son hémisphère intérieur. Cependant toutes les parties d'un corps se meuvent ; aussi bien les parties sur lesquelles la force n'agit pas, que les parties qu'elle pousse directement. Il faut donc qu'il se fasse un partage du mouvement entre toutes les molécules, et un partage égal, afin qu'aucune ne prenne l'avance et qu'aucune

ne reste en retard : celles qui sont directement choquées poussent les voisines, celles-ci les suivantes, et ainsi de proche en proche, jusqu'à ce qu'enfin toute la masse soit ébranlée et que toutes les parties se meuvent d'un commun mouvement. Pour passer d'une molécule à l'autre, et pour se répandre dans toute la masse, le mouvement exige un certain temps qui n'est pas très grand, mais qui n'est pas non plus infiniment court; la durée de cette diffusion du mouvement est analogue à la durée qui est nécessaire pour qu'un fluide se répande dans un vase et s'y mette de niveau : elle dépend de la masse et de la nature du corps; c'est pourquoi il n'y a jamais de mouvement qui soit absolument instantané. Ce principe s'étend à toute matière, même à celle qui entre dans la composition des corps organiques : dans l'animal le plus vif, le mouvement n'est pas aussi rapide que la pensée, il faut un certain temps très court pour qu'il prenne son essor et sa vitesse. Un oiseau peut voir la flèche qui vient le frapper, mais la flèche est plus rapide que les contractions musculaires, et, n'eût-il qu'à tourner la tête pour éviter le coup, la tête est percée avant que le jeu des muscles ait produit son effet. Il y aurait de curieuses recherches à faire sur la rapidité de la contraction des divers organes dans les divers animaux.

29. *De la quantité de mouvement.* — Quand une force agit sur un corps, quand le mouvement s'est répandu dans toutes les parties de la masse et que toutes se meuvent d'une vitesse commune, tout est fini pour la force, elle a produit tout son effet, et l'on peut dire qu'elle est passée dans le mobile, qu'elle s'y est répandue, et qu'elle y reste comme si elle y était enfermée.

Ainsi, le projectile lancé par la main, par un ressort qui se débande, par un choc rapide ou par une explosion soudaine, s'en va, parcourant l'espace, pour obéir à la force qui a produit son effet, et qui, présentement, n'agit plus sur lui. Si ce projectile ne rencontrait rien, ni l'air, ni l'eau,

ni aucun fluide, ni aucun corps en repos, ni aucun corps en mouvement; si, en outre, aucune autre puissance n'agissait sur lui, il s'en irait suivant la ligne de l'impulsion qu'il a premièrement reçue, et il la parcourrait d'un mouvement uniforme sans se dévier et sans s'arrêter; après un siècle, comme après une seconde, il aurait encore la même direction et la même vitesse. Cette permanence du mouvement est, comme nous l'avons vu, l'un des attributs de l'inertie : on peut l'exprimer en disant que l'action d'une force ne dure qu'un instant, et que l'effet qu'elle produit *se continue* éternellement.

C'est ainsi que le mobile conserve l'empreinte de la force à laquelle il a été soumis, et l'on conçoit que, la force restant la même, elle produirait des effets très différens sur des mobiles différens. La charge de poudre qui lance une balle pourrait à peine soulever une bombe, et l'on sait bien que l'arc qui lance au loin une flèche légère ne pourrait pas lancer avec la même vitesse une flèche plus pesante. On entend dire assez généralement que cette différence dépend de la pesanteur, mais c'est une explication fort trompeuse, car elle semble indiquer que, si tous les corps cessaient d'être pesans, ils seraient tous projetés avec la même vitesse, ce qui est une grande erreur. Supposons pour un moment que les corps dont nous venons de parler cessent d'être pesans, supposons même qu'il n'y ait plus d'air qui s'oppose à leur mouvement; il arriverait encore que la balle irait plus vite que la bombe, et que la flèche de bois serait aussi plus rapide que la flèche de fer, parce que la même force appliquée à des quantités de matière différentes imprime une vitesse d'autant moindre que la quantité de matière est plus grande. Voici sur ce point important un axiome qui est un principe essentiel de mécanique : *Quand une même force agit sur des mobiles différens, elle leur imprime des vitesses qui sont en raison inverse de leurs masses ou de la quantité de matière qui les compose.* Ainsi, la même force d'explosion qui lance-

rait successivement des balles de plomb dont les volumes, et par conséquent les quantités de matière, seraient 1, 2, 3, 4, etc., ne leur imprimerait que des vitesses 1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, etc., tellement que la balle dont la masse serait 10 ne recevrait qu'une vitesse $\frac{1}{10}$, celle dont la masse serait 100 ne recevrait qu'une vitesse cent fois plus petite, et ainsi de suite : d'où l'on voit que, pour chacune, la masse multipliée par la vitesse donne le même nombre ; car, pour la première ce produit est de $1 \times 1 = 1$, pour la seconde $2 \times \frac{1}{2} = 1$, etc. C'est ce produit de la masse d'un mobile pour sa vitesse qu'on appelle *quantité de mouvement*. Il suit de là qu'une même force d'impulsion donne toujours une même quantité de mouvement, quel que soit le projectile qu'elle pousse, et qu'ainsi la quantité de mouvement caractérise une force et devient sa véritable mesure.

On dit qu'une force d'impulsion est double, triple ou quadruple d'une autre, quand elle produit une quantité de mouvement qui est double, triple ou quadruple ; d'où résultent ces trois conséquences :

1° *Les forces sont entre elles comme les quantités de mouvement qu'elles produisent, ou bien qu'elles sont entre elles comme les produits des masses par les vitesses;*

2° *Pour des masses égales, les forces sont entre elles comme les vitesses qu'elles impriment;*

3° *Pour des vitesses égales, les forces sont entre elles comme les masses sur lesquelles elles agissent.*

30. *De la communication du mouvement.* — Quand un corps en mouvement rencontre un corps en repos ou un autre corps en mouvement, il se produit des effets très curieux, qui dépendent de l'élasticité, de la dureté, et de la masse relative des corps. Jusqu'à présent la science n'est parvenue à faire l'analyse de ces phénomènes qu'en supposant les corps parfaitement élastiques, ou en les supposant complètement dénués d'élasticité ; hypothèses qui ne sont vraies ni l'une ni l'autre, mais d'où l'on déduit cependant

quelques règles simples, qui sont très utiles dans la pratique. Nous ne pouvons considérer ici que les corps sans élasticité, les singuliers phénomènes des corps élastiques devant être discutés en détail dans l'un des livres suivans.

1°. Quand deux masses égales, non élastiques, et animées de la même vitesse, viennent à se choquer *directement*, elles se pressent l'une l'autre, s'arrêtent tout-à-coup, et restent en repos dans le lieu même où le choc a eu lieu. C'est un principe évident de lui-même, car ces masses ne peuvent rejaillir puisqu'elles manquent d'élasticité, et l'une ne peut entraîner l'autre et la pousser devant elle puisque tout est égal dans les deux sens opposés. Ainsi, deux balles de plomb parfaitement égales, qui seraient lancées en même temps avec la même force, arrivant l'une contre l'autre avec la même vitesse, s'aplatiraient, parce qu'elles ne sont pas dures, et resteraient sans mouvement. Si elles tombent après le choc, ce n'est point par un reste de vitesse qui n'aurait pas été détruit, mais bien par l'effet de la pesanteur qui agit sans cesse sur elles.

2°. Ce principe s'applique aux masses inégales, sous la seule condition que leurs quantités de mouvement soient égales entre elles, c'est-à-dire que, si l'une des masses est double de l'autre, il suffit que celle-ci ait une vitesse double pour être capable d'arrêter la première; une masse qui serait cent fois plus petite devrait avoir une vitesse centuple pour produire le même effet, et ainsi de suite : une balle de plomb d'une once arrêterait exactement un biscaïen d'une livre si elle avait une vitesse seize fois plus grande que celle du biscaïen, et elle arrêterait un boulet de 48 si sa vitesse était sept cent soixante-huit fois plus grande que celle de ce boulet, puisqu'une once est la sept cent soixante-huitième partie de quarante-huit livres. Deux quantités de mouvement, égales et contraires, se détruisent exactement quand l'élasticité n'est pas en jeu, parce qu'en effet deux quantités de mouvement égales et contraires n'étant en réalité, comme

nous l'avons vu, que deux forces égales et contraires, il faut bien qu'elles se détruisent.

3°. Quand les quantités de mouvement sont inégales, c'est la plus grande qui l'emporte; le mobile qui en est animé repousse devant lui l'autre mobile, il le force de rebrousser chemin, et, à partir de cet instant, ils se meuvent ensemble avec une vitesse qui leur est commune.

Alors, la quantité de mouvement qui reste n'est que la différence des deux quantités de mouvement primitives, et, comme elle est appliquée à la somme des deux masses, on voit que la vitesse restante n'est autre chose que cette différence des quantités de mouvement divisée par la somme de ces masses.

Si les mobiles allaient dans le même sens, les quantités de mouvement s'ajouteraient, et la vitesse commune, qui succéderait au choc, serait alors la somme des quantités de mouvement divisée par la somme des masses.

Ces conséquences s'appliquent au cas où un mobile rencontre un corps en repos; car pour avancer il est forcé de pousser devant lui ce corps en repos, et par conséquent de lui communiquer une telle quantité de mouvement qu'après le choc ils se meuvent ensemble d'une vitesse commune. Si la masse du corps en repos est égale à celle du mobile, il est clair qu'après le choc le mouvement sera également partagé entre les deux masses, et la vitesse ne devra être que moitié puisque la masse est devenue double; elle ne serait que le tiers de la vitesse primitive si la masse en repos était double de la masse du mobile; et l'on voit qu'en général, pour avoir le rapport de la vitesse qui a lieu après le choc à celle qui avait lieu avant le choc, il faut diviser la masse du mobile par la somme des masses du mobile et du corps en repos. Ainsi, une balle d'infanterie pesant $\frac{1}{20}$ de livre, et sa vitesse au sortir du canon étant de 1300 pieds par seconde, on voit qu , si elle vient frapper un boulet de 48 qui soit en repos, elle le pousse devant elle; et leur vitesse commune est à la

vitesse de 1300 pieds comme $\frac{1}{20}$ est à $48 + \frac{1}{20}$, ou comme 1 est à 961, c'est-à-dire qu'elle est $\frac{1300}{961}$, ou à-peu-près de 1 pied et $\frac{1}{3}$ par seconde.

Quand une balle vient frapper un grand bloc de pierre, ou une montagne, elle doit aussi lui imprimer une certaine vitesse; seulement cette vitesse est très petite, car, le bloc de pierre pesant seulement cinq cents livres, la vitesse, après le choc, serait à 1300 pieds comme $\frac{1}{20}$ est à $500 + \frac{1}{20}$, ou comme 1 : 10001, c'est-à-dire qu'elle ne serait guère de plus d'un pouce par seconde ; mais la résistance et le frottement ont bientôt détruit ce mouvement, qui se communique de proche en proche à tous les corps voisins, et même à la masse entière de la terre.

Ainsi, le mouvement se communique et ne se perd jamais : quand il semble s'éteindre, c'est qu'en réalité il sort du mobile pour passer dans les corps qui se trouvent sur son chemin ; il se répand de proche en proche dans tous les corps qui sont contigus à ceux-ci, et il y devient insensible par la grande diffusion qu'il y éprouve. Il faut du mouvement pour détruire le mouvement; les résistances et les frottemens le dispersent et ne le détruisent jamais.

C'est d'après ces données que l'on mesure la vitesse des projectiles, au moyen du *pendule balistique*, qui est représenté dans la figure 25. Cet appareil se compose d'un axe de fer *a*, terminé en couteau par ses deux bouts, et reposant sur des appuis solides ; un bloc de bois *b*, d'un poids considérable, muni d'armatures en fer, est suspendu à l'axe *a* par les deux tiges droites *t* et par les quatre tiges obliques *d*; une aiguille pointue *e* parcourt une rainure circulaire *f*, et laisse sa trace sur une cire molle destinée à la recevoir ; c'est par la longueur de cette trace que l'on juge de l'écart qu'a éprouvé le pendule, lorsque le boulet est venu le frapper de front, dans la direction de son centre de gravité. La longueur du pendule est de trois ou quatre mètres, et son poids total de trois ou quatre mille kilogrammes ; c'est avec

cette masse considérable que le projectile partage la vitesse dont il est animé ; et, lorsqu'au moyen de l'écart que le pendule a éprouvé, on a pu calculer la vitesse qu'il a reçue, il est facile d'en déduire la vitesse du boulet, à l'instant où il est venu le frapper.

Il se présente dans la communication du mouvement des phénomènes singuliers qui dépendent de l'état d'agrégation des corps et de la rapidité avec laquelle le mouvement peut se transmettre de molécule à molécule dans l'intérieur d'une même masse. On sait, par exemple, qu'une balle traverse un carreau de vitre sans le rompre, et qu'elle y fait seulement un trou, comme ferait un emporte-pièce dans une feuille de métal. Cet effet ne dépend que de la vitesse de la balle, et non pas de sa forme ; car, si on la jette avec la main, elle casse le carreau tout aussi bien que le casserait une pierre. Mais, dès qu'elle s'avance avec la rapidité que lui donne la poudre, les molécules qu'elle touche sont enlevées si vivement qu'elles n'ont pas le temps de transmettre sur les côtés le mouvement qu'elles reçoivent : tout se passe alors dans le cercle que frappe la balle, et le carreau tout entier, ne fût-il soutenu que par un fil de soie, n'éprouverait pas le moindre ébranlement.

C'est par la même raison que l'on a vu souvent un boulet de canon couper en deux le fusil d'un fantassin sans que celui-ci ressentît la moindre pression, à-peu-près comme avec une baguette on coupe une tête de pavot sans faire fléchir la tige. Pareillement, on croyait que la bombe pourrait emporter avec elle une corde très souple et très tenace, qui n'aurait qu'à se dérouler pour suivre le mouvement, et que de cette manière on pourrait sans danger porter un prompt secours à une grande distance, soit dans les naufrages ou les incendies, soit dans d'autres pressantes détresses : mais à l'expérience on n'a pu réaliser cet ingénieux projet ; la corde casse, et ne suit point la bombe. Il faudrait un projectile dont la vitesse s'accrût assez lentement pour que l'adhésion

des molécules pût résister aux secousses ; car nous devons considérer la force d'adhésion, qui unit les molécules des corps, comme une sorte de lien immatériel qui ne peut supporter qu'un certain effort sans se rompre. Une molécule étant tirée, et l'autre étant en repos, le lien se brise si elle est tirée trop vivement, et, dans un temps donné, il ne peut passer ainsi d'une molécule à l'autre qu'une quantité de mouvement donnée.

Le mouvement produit par une explosion, soit par celle de la poudre, soit par celle de l'air ou de la vapeur comprimés, est un mouvement qui se communique essentiellement dans tous les sens. Les parois du canon empêchent l'expansion latérale, et tout l'effet se porte dans le sens de la longueur ; mais, là, il se produit également dans les deux directions contraires, c'est-à-dire en avant pour pousser le projectile, et en arrière pour repousser la culasse, le canon et toutes les pièces qui en dépendent. Ces deux quantités de mouvement, qui sont toujours opposées, sont aussi toujours égales ; de là vient le *recul*, qui accompagne inévitablement le départ du projectile. Si le fusil n'est pas repoussé contre l'épaule avec toute la vitesse de la balle, et si le canon et ses affûts ne reculent pas aussi vite que part le boulet, c'est seulement parce que les projectiles ont beaucoup moins de masse que les armes qui servent à les lancer. Quand un chasseur tire un coup de fusil, son épaule éprouve la même pression que si une balle venant du dehors entrait dans le canon, et en frappait le fond avec toute la vitesse de la balle qui sort.

On conçoit qu'il suffit de connaître le poids de l'arme, le poids du projectile et la vitesse du recul, pour en déduire la vitesse du projectile à son départ. C'est une méthode qui a été employée avec succès par Robins. Une circonstance digne de remarque, et qui est une autre preuve de la lenteur avec laquelle le mouvement se répand dans toute l'étendue d'une masse considérable, c'est que le recul ne commence à être

sensible que quand le boulet est sorti du canon. L'expérience en fut faite pour la première fois à La Rochelle vers 1667, par les ordres du cardinal de Richelieu. On avait suspendu un canon à l'extrémité d'un grand levier mobile, et le boulet qui en sortait venait frapper le but, comme si le canon n'avait pu faire son recul que dans la direction même du mouvement du projectile.

La résistance des milieux n'est qu'un effet de la communication du mouvement. Quand un corps se meut dans l'eau, il est forcé d'écarter la couche qu'il rencontre, et tout le mouvement qu'il lui donne est autant de mouvement qu'il perd; puis, à mesure qu'il avance, il rencontre d'autres couches en repos, les écarte pareillement, et perd ainsi de nouvelles quantités de mouvement. Il en est de même pour tout autre milieu, tel que celui de l'air, d'un gaz ou d'un fluide quelconque. On admet dans tous ces phénomènes un principe général, savoir : que la *résistance d'un milieu* est proportionnelle au *carré de la vitesse* du corps qui le traverse, et voici la raison que l'on en donne : Quand la vitesse devient double, le corps parcourt une fois autant d'espace dans le même temps, et de là résulte : 1° qu'il rencontre une fois autant de molécules auxquelles il donne du mouvement, ce qui lui fait déjà une perte double ; 2° que, comme il va une fois plus vite, il donne à ces molécules une fois autant de vitesse, ce qui double encore sa perte et la rend ainsi quatre fois plus grande. Donc, quand la vitesse devient 2, la perte devient 4, qui est le carré de deux. On voit de même qu'avec une vitesse triple il rencontre trois fois autant de molécules, auxquelles il donne trois fois plus de vitesse, ce qui fait une perte neuf fois plus grande ; et ainsi de suite. Pour des vitesses égales dans des milieux différens, les pertes dépendent de la quantité de matière que contiennent ces milieux sous un volume donné, et de l'adhérence ou de la viscosité plus ou moins grande qui existe entre les molécules.

31. *De la force centrifuge.* — Concevons une petite boule

sans pesanteur attachée à l'extrémité d'un fil inextensible *m* (*fig.* 27), et supposons qu'on lui donne une impulsion pour la faire tourner autour du point *c*, comme la pierre d'une fronde tourne autour de la main. Il est clair que la boule décrira un cercle entier, puis un autre cercle, et ainsi de suite indéfiniment; s'il n'y avait pas de résistance, ce serait un mouvement perpétuel, et perpétuellement uniforme. La vitesse de ce mouvement circulaire est égale à l'espace divisé par le temps, comme celle du mouvement rectiligne. En même temps le fil éprouve une tension, car, si on le coupe à un instant donné, la boule ne se mouvra plus en cercle comme elle faisait auparavant, mais elle ira droit devant elle, en suivant la tangente sur laquelle elle se trouve. C'est la cause de cette tension du fil qu'on appelle *force centrifuge*, parce qu'en effet c'est l'effort que fait la boule pour fuir le centre, ou, ce qui revient au même, c'est l'effort qu'il faut faire pour la retenir et l'empêcher de s'en éloigner.

Quand la pierre d'une fronde tourne lentement, la corde est peu tendue; quand elle tourne vite, la corde se tend davantage; ainsi la force centrifuge est dépendante de la vitesse de rotation, elle croît et décroît avec elle dans un certain rapport. On démontre en mécanique que dans les cercles inégaux, qui sont décrits dans le même temps, les forces centrifuges sont proportionnelles aux rayons. Par exemple, dans une roue horizontale ou verticale qui tourne autour d'un axe, la force centrifuge sera proportionnelle à la distance au centre.

L'appareil représenté dans la figure 26 montre cet effet d'une manière frappante : lorsque le ressort *ab* est en repos, il est à-peu-près circulaire; mais, aussitôt qu'on le fait tourner autour de son axe *c*, au moyen de la manivelle *m*, et de la corde croisée *d*, le ressort *ab* devient elliptique, et s'affaisse d'autant plus que la vitesse est plus grande; les points les plus distans de l'axe étant ceux qui s'en écartent le plus, par l'effet de la force centrifuge.

Pour des cercles égaux, décrits dans des temps différens, les forces centrifuges sont en raison inverse des carrés des temps.

Si le mouvement n'était pas circulaire, s'il suivait une autre courbe quelconque, il n'y en aurait pas moins une force centrifuge; mais alors elle serait évaluée d'une autre manière. Dans tout mouvement curviligne la force centrifuge existe, et il faut toujours, pour l'empêcher d'avoir son effet, ou un fil qui retienne le mobile, ou une résistance qui l'empêche de s'éloigner, ou enfin une force attractive qui agisse sans cesse sur lui et qui le presse vers le centre de rotation, autant que la force centrifuge le pousse à s'en écarter.

32. *Mouvement uniformément accéléré.* — On appelle *mouvement varié*, en général, le mouvement rectiligne ou curviligne dans lequel la vitesse change à chaque instant. Le mouvement est dit *accéléré* si la vitesse va en augmentant, et *retardé* si elle va en diminuant. On conçoit qu'il y a une infinité de mouvemens variés, car la vitesse d'un mobile peut changer en plus ou en moins d'une infinité de manières différentes. En général, dans les mouvemens variés de la nature, la vitesse change suivant des lois assez simples pour qu'on puisse analyser toutes les circonstances que présente le mobile, pendant des temps très considérables.

33. Dans le mouvement varié la vitesse n'a pas le rapport de l'espèce au temps, comme dans le mouvement uniforme. Concevons un mobile qui se meuve d'un mouvement accéléré ou retardé, d'une manière quelconque: puisque son mouvement n'est pas uniforme, c'est qu'à chaque instant il y a une force nouvelle qui vient troubler l'uniformité, qui vient agir dans le sens même du mouvement pour en augmenter la vitesse, ou en sens contraire pour la diminuer; c'est là la cause nécessaire de la variation. Réciproquement, si, à une époque quelconque du mouvement varié, aucune force nouvelle ne venait agir sur le mobile, il est clair que toute variation cesserait à l'instant, et que le mobile continuerait de

se mouvoir en ligne droite et d'un mouvement uniforme. Or, la vitesse de ce mouvement uniforme qui succéderait ainsi au mouvement varié, si aucune force nouvelle ne survenait pour soutenir la variation, est précisément ce que l'on nomme la *vitesse du mouvement varié.*

Le mouvement *uniformément accéléré* est une espèce particulière du mouvement varié, c'est celui dans lequel la vitesse croît proportionnellement au temps ; on peut le définir aussi en disant qu'il est le mouvement produit par une force *accélératrice constante*, c'est-à-dire par une force qui agit toujours sur le mobile, et qui a toujours la même direction et la même grandeur; car, on démontre en mécanique qu'il n'y a que les forces de cette nature qui puissent imprimer au mobile des vitesses qui deviennent doubles, triples ou quadruples.

34. Toutes les lois du mouvement uniformément accéléré sont comprises dans les deux formules suivantes :

$$v = gt$$
$$e = \frac{gt^2}{2},$$

dans lesquelles t est le temps qui s'est écoulé depuis le départ du mobile, g la vitesse qu'il a acquise après une unité de temps, v celle qu'il a acquise après le temps t, et e l'espace total qu'il a parcouru dans le même temps. De ces quatre choses, deux étant connues, on peut trouver les deux autres. Nous en verrons de très utiles applications en traitant de la pesanteur.

FIN DES NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

LIVRE PREMIER.

DE LA PESANTEUR.

CHAPITRE PREMIER.

Des effets de la pesanteur et de sa direction.

35. Les corps tombent quand on les abandonne à eux-mêmes, et ils tombent jusqu'à ce qu'ils touchent la terre ou quelque autre corps qui les soutienne. Ce phénomène se produit à la surface du sol, comme on l'observe tous les jours; il se produit à de grandes hauteurs dans le ciel, comme on peut en juger par la grêle et par la pluie qui tombent des nuages; et il se produit encore à de grandes profondeurs sous terre, comme on le voit dans les puits, dans les caves et dans les mines les plus profondes que l'on ait pu creuser : quand on voit des montagnes qui s'affaissent, c'est qu'elles manquent par leur base, qui sans doute est encore plus enfoncée que le fond des mines ; elles *tombent*, faute d'avoir un appui qui soit assez ferme pour les soutenir. Cependant, la matière étant inerte, et ne pouvant d'elle-même ni prendre du mouvement ni changer celui qu'elle a, il est clair que d'elle-même elle ne pourrait descendre vers la terre, puisque ce serait se donner du mouvement; il faut donc qu'il y ait une force qui la fasse tomber, et c'est cette force qu'on appelle *pesanteur*.

Ainsi la *pesanteur* est la force qui fait *tomber* les corps. Mais cette définition donnerait de la *pesanteur* une idée tout-à-fait incomplète, si l'on supposait qu'elle ne pût produire d'autre effet que de faire *tomber* les corps. Il faut s'attendre à

voir cette force produire encore beaucoup d'autres phénomènes et beaucoup d'autres mouvemens, qui sont désignés dans le langage usuel par des mots très différens. Tels sont, par exemple, les mouvemens des liquides qui s'écoulent des vases, et le mouvement des fleuves qui coulent vers la mer; tels sont les mouvemens du liége et des corps légers qui s'élèvent du fond de l'eau à sa surface; tels sont encore les mouvemens de la fumée, des brouillards et des ballons qui s'élèvent dans les airs. Tous ces phénomènes, qui semblent si contradictoires, ne sont que les effets variés de la même force, que nous venons d'appeler *pesanteur*.

Pour embrasser dans toute son étendue l'étude d'une force aussi féconde en résultats, nous aurons donc à rechercher tous les phénomènes différens qu'elle peut produire, et à déterminer ensuite les lois des actions qu'elle exerce, suivant les lieux qu'occupent les corps, suivant les arrangemens de leurs parties et l'espèce de matière qui les compose.

Nous voyons d'abord que la pesanteur agit sur presque tous les corps qui se présentent à nos observations, mais qu'elle agit sur eux pour les faire tomber avec des vitesses très différentes. Les pierres et les métaux tombent très vite, le bois et les autres substances végétales tombent plus lentement : et il existe des corps, comme les plumes, les duvets et les flocons de neige, qui semblent à peine pesans, car ils flottent dans les airs, et ne tombent qu'avec une grande lenteur. Il résulte déjà de ce premier aperçu que, si la pesanteur n'est pas une force universelle, c'est au moins une force très générale ; car il n'y a qu'un petit nombre de corps, comme la flamme et la fumée, qui semblent se soustraire à son action. C'est là du moins ce qui arrive en nos climats, et ce dont nous sommes témoins dès les premiers jours de notre enfance ; mais la terre est si grande qu'il est curieux de savoir ce qui se passe en d'autres lieux, sur les mers éloignées, sur les îles ou sur les continens qui n'ont plus ni les mêmes saisons, ni la même position par rapport

à l'axe du monde. C'était aux voyageurs à nous l'apprendre, et les voyageurs nous assurent que, si d'un pays à l'autre on voit changer les hommes, l'aspect du ciel et les productions du sol, il y a toujours une chose qui, au milieu de tant de variations, n'éprouve point de changement; c'est la force de la pesanteur : partout elle agit de la même manière, soit au milieu des mers ou des continens, soit dans les régions des pôles ou dans celles de l'équateur. Que s'il se trouve quelques légères différences, elles ne sont pas sensibles dans les phénomènes ordinaires ; et il est vrai de dire que non-seulement la pesanteur agit sur presque tous les corps, mais encore qu'elle agit à-peu-près de la même manière dans tout le vaste contour du globe de la terre.

36. *Direction de la Pesanteur.* — Pour déterminer la ligne suivant laquelle tombent les corps, on pourrait les suivre de l'œil et approcher une règle droite dont ils dussent raser le bord; mais il y a un meilleur moyen, qui est de fixer un fil par un bout et d'attacher à l'autre bout une petite balle un peu pesante. La direction du fil, quand il sera tendu et en repos, sera précisément la direction de la pesanteur; car, si cette force agissait suivant une autre ligne, elle tirerait le fil et l'entraînerait suivant cette autre ligne. Ce petit instrument s'appelle un *fil-à-plomb* ou un *pendule*, et sa ligne de repos s'appelle *la verticale* (*fig.* 28); ainsi la direction de la pesanteur est celle du fil-à-plomb ou de la verticale, et rien n'est plus facile que de la trouver à chaque instant dans tous les lieux de la terre.

Supposons qu'après avoir fait cette expérience hier, nous la recommençions aujourd'hui; nous serons fort embarrassés de savoir si le fil-à-plomb n'a pas changé dans l'intervalle. Il faudrait avoir quelques points fixes où l'on pût rapporter ses directions, pour les comparer ensuite. Un édifice très solide n'a pas assez de stabilité pour cet objet; car, si, après un certain temps, nous trouvions que le fil-à-plomb n'est plus à la même ligne par rapport à ses murs ou à ses arêtes,

nous serions encore très embarrassés pour une conclusion ; nous saurions bien que quelque chose est changé, mais nous ne saurions pas si c'est dans la direction de la pesanteur ou dans la stabilité de l'édifice. Les flancs ou les arêtes d'une montagne ne seraient pas des marques moins incertaines : car, sur la terre, une montagne aussi est une chose instable ; il faut moins qu'un tremblement de terre pour l'ébranler sur sa base. Ainsi, tout est mobile autour de nous, et nous n'avons pas un point fixe, ni sur la terre ferme, ni sur les montagnes, pour juger si la pesanteur est constante ou si elle change à mesure que les siècles s'écoulent.

Heureusement, nous avons un autre moyen : la surface de la mer, toute mobile qu'elle est, nous offre dans sa direction générale et dans ses limites la plus grande stabilité que nous puissions observer sur la terre : car, un changement de niveau, même très petit, amènerait de grandes inondations et peut-être un déluge ; or il arrive, non pas fortuitement, mais par une raison que nous verrons plus tard en hydrostatique, il arrive que la direction de la pesanteur est perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles ; donc, si la pesanteur changeait, la mer changerait, et c'est par là seulement qu'on peut juger de la fixité de sa direction.

Au lieu de dire que la pesanteur est perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles, on dit quelquefois qu'elle est perpendiculaire à la surface de la terre; et voici alors ce qu'on entend par la surface de la terre. Ce n'est pas, comme on le suppose bien, la surface apparente avec ses montagnes et ses vallées, mais c'est une surface idéale que l'on conçoit de la manière suivante : supposons que l'Océan atlantique, la mer du Sud et toutes les mers qui communiquent entr'elles, soient tranquilles pour un moment, leur immense plage formera une portion de surface à-peu-près sphérique, dont le contour sera déterminé par les sinuosités des rivages. Imaginons maintenant que les diverses parties de cette surface se prolongent en conservant leur courbure et en pénétrant sous

les terres, et qu'elles se rejoignent de toutes parts au-dessous des continens; elles formeront alors un globe complet parfaitement uni, n'ayant ni montagnes ni vallées. C'est cette surface, réelle en partie, et en partie idéale, qu'on appelle *surface de la terre, surface de niveau, surface horizontale*, car toutes ces expressions sont synonymes. Quand on dit que l'Observatoire de Paris est à 65 mètres au-dessus de la surface de la mer, c'est comme si l'on disait que cette surface prolongée passe sous le premier étage de l'Observatoire, à une profondeur verticale de 65 mètres. Au contraire, il y a des plaines en Hollande qui sont au-dessous de la mer, c'est-à-dire que la surface prolongée passe sur la tête des habitans.

La *surface de la terre*, telle que nous venons de la définir, pourrait, avec le temps, s'élever ou s'abaisser, s'éloigner ou se rapprocher du centre; mais, si, par quelque cause intérieure ou extérieure, elle pouvait perdre sa forme, à l'instant la terre changerait son mouvement diurne, elle sortirait de l'orbite qu'elle parcourt depuis tant de siècles, et serait peut-être poussée dans quelque autre coin de l'univers. C'est ainsi que de la stabilité de la surface des eaux dépend la stabilité de la terre et du monde.

La surface d'un lac, soit dans les plaines, soit dans les montagnes, est aussi une surface de niveau, c'est-à-dire que, si de ses rivages on abaissait des perpendiculaires sur la surface que nous venons de définir, elles y détermineraient une portion de surface qui serait semblable à celle du lac, et dont tous les points en seraient à la même distance. Il en est de même pour les surfaces des eaux tranquilles, soit au fond des puits, soit dans des vases de grandes dimensions : toutes ces surfaces sont horizontales, et toutes perpendiculaires à la direction de la pesanteur.

Il résulte de ces vérités fondamentales que toutes les directions de la pesanteur concourent vers le centre de la terre, car toutes les perpendiculaires à une surface rigou-

reusement sphérique concourent à son centre. Ainsi, *abpdx* (*fig.* 29), représentant la section de la terre qui serait faite par le méridien de Paris, et *ax* étant l'axe de rotation, il arrive, par les distances en latitude, que Paris se trouve en *p*, son horizon suivant *ph*, et son fil-à-plomb suivant *pc*; que Dunkerque est en *dc* à une distance de 2° 11′ 56″, la ligne horizontale de Dunkerque en *dh′*, et son fil-à-plomb suivant *d*; enfin, que Barcelonne est en *b* à 7° 28′ 29″ plus au midi, l'horizontale de Barcelonne en *bh″* et son fil-à-plomb en *bc*.

Un observateur qui serait assez loin de la terre pour voir en même temps le fil-à-plomb de Paris et celui de Barcelonne, verrait qu'en effet ils sont inclinés l'un à l'autre de 7° 28′ 29″, et pourrait en conclure qu'ils concourent vers le centre de la terre. Quand on fait des expériences dans une petite étendue, comme dans un appartement ou même dans une grande ville, les fils-à-plomb semblent tout-à-fait parallèles, parce que le centre de la terre, qui est le point où ils tendent, est à une distance d'environ 1432 lieues de 2280 toises, ou de 1632 lieues de poste de 2000 toises: or, 100 toises, par exemple, étant à-peu-près la trente-millième partie de cette distance, deux fils-à-plomb qui sont à 100 toises ne font en effet qu'un angle de 6″, 3. Mais, puisqu'il en est ainsi, on ne comprend pas d'abord comment on peut mesurer l'angle des verticales de deux points; car, si ces points sont très près, l'angle est si petit qu'il échappe aux mesures, et, s'ils sont très loin, on ne peut plus voir en même temps ni les deux verticales ni l'angle qu'elles font entre elles; toute mesure paraît donc impossible, et le serait en effet, si nous n'avions pas dans le ciel des points d'observation qui servent à nous guider. Les étoiles sont comme des jalons pour les habitans de la terre : c'est en les observant que nous pouvons mesurer nos angles et tracer nos alignemens. La distance du soleil à la terre est de 35 millions de lieues, celle de la terre aux étoiles est 400 ou

500 mille fois 35 millions de lieues ; ainsi, en quelque point de son orbite que soit la terre, et en quelque point de la surface de la terre que soit un observateur, les rayons visuels dirigés sur la même étoile sont des lignes toujours parallèles.

D'après cela, quand une étoile passe au méridien, et qu'on l'observe au même instant à Dunkerque et à Paris, les deux rayons *de* et *pe* (*fig.* 30) sont parallèles, mais les deux angles qu'ils font avec les verticales sont inégaux, et l'angle de Paris *epv* est justement égal à l'angle de Dunkerque *edv'*, plus à l'angle *pcd* des deux verticales, qui est par conséquent la distance angulaire de Dunkerque à Paris.

Voilà donc comment se dirige la pesanteur tout autour de la terre, et voilà comment il est possible de comparer sa direction dans les différens lieux. Il y a une conséquence qui se présente naturellement : c'est qu'après avoir observé l'angle des verticales de Dunkerque et de Paris, après l'avoir trouvé de 2° 11′ 56″, on peut mesurer en toises ou en mètres la distance de ces deux villes ; et, connaissant ainsi la longueur de cet arc de 2° 11′ 56″, on peut en conclure la longueur de la circonférence de la terre tout entière et ensuite la valeur de son rayon, comme nous le verrons dans un des chapitres suivans.

CHAPITRE II.

De la chute des corps et des lois de la pesanteur.

37. Lorsqu'on laisse tomber de la même hauteur une balle de plomb et un petit disque de papier, on est frappé de la différence de leurs vitesses. La balle tombe très vite, et le papier très lentement; on peut même remarquer que le premier de ces corps tombe d'aplomb, et suivant la verticale, tandis que le deuxième, plus ou moins dévié de sa route, parcourt toujours une ligne sinueuse. C'est l'air qui produit cet effet. Les corps ne peuvent pas tomber sans le déplacer et par conséquent sans partager avec lui leur mouvement, et, dans ce partage, le papier perd plus que le plomb. On obtiendrait des effets analogues et encore plus marqués si l'on faisait tomber différens corps dans un tube plein d'eau; parce que la résistance de l'eau est plus grande que celle de l'air.

Pour trouver le vrai mouvement des corps pesans, il faudrait donc les faire tomber dans le *vide* (2), c'est-à-dire dans un espace où il n'y eût ni air, ni eau, ni aucune autre matière capable d'offrir de la résistance et de combattre l'action de la pesanteur. Un tel espace s'obtient au moyen de la *machine pneumatique*, qui fait le vide en aspirant l'air, comme nous le verrons plus loin. Au moyen de cette machine, on fait l'expérience de la chute des corps de la manière suivante.

On prend un tube de verre de huit ou dix pieds de long, fermé par un bout, et muni à l'autre bout d'un robinet de forme ordinaire, capable de *tenir le vide;* par l'ouverture du robinet, on fait passer dans le tube des morceaux de plomb, du papier, des plumes, etc.; on fait le vide avec beaucoup

de soin, et on ferme le robinet. Alors, en tournant promptement le tube, pour le mettre dans la verticale, on voit tous ces corps tombant librement dans son intérieur venir au même instant frapper le fond.

On peut modifier cette expérience de manière à rendre sensible le progrès du phénomène : on entr'ouvre un peu le robinet et on le ferme presque aussitôt; alors un peu d'air est rentré, car on en a entendu le sifflement; et, en retournant le tube comme la première fois, on observe un peu de différence dans le temps de la chute; la plume et le papier sont en retard sur le plomb. Un peu plus d'air rend le retard un peu plus long, et ainsi progressivement : tant qu'à la fin, l'air étant complètement rentré, la chute se fait dans le tube comme elle se fait à l'air libre.

Ainsi, quand la pesanteur agit seule, quand elle n'est combattue par aucune résistance qui gêne ses effets, elle sollicite tous les corps avec la même énergie et leur imprime la même vitesse, quel que soit leur poids, et quelle que soit la substance qui les compose. Dans le vide, une masse d'or de cent livres ne tomberait pas plus vite qu'une parcelle d'or en feuilles, ni plus vite qu'un morceau de papier; une montagne ne tomberait pas plus vite qu'une plume.

38. Après avoir montré que, dans la réalité, tous les corps tombent avec la même vitesse, il faut chercher quelle est cette vitesse commune qui règle la chute de toute espèce de matière, et, en général, quel rapport il existe entre l'espace que parcourt un corps pesant et le temps qu'il emploie à le parcourir. Ce rapport sera la loi de la pesanteur, c'est-à-dire la loi du mouvement que la pesanteur imprime à la matière.

Cette question ne peut pas être résolue d'une manière directe, parce que la vitesse des corps qui tombent prend une accélération si rapide qu'au bout de très peu d'instans il n'est plus possible de noter les espaces qu'ils parcourent. Mais, ce qui ne peut pas être obtenu par des observations

directes, s'obtient par divers moyens indirects : le plus simple est le *plan incliné de Galilée*, mais le plus rigoureux est la *machine d'Atwood*.

39. *Plan incliné de Galilée.* — Ce qu'on appelle plan incliné de Galilée n'est, à vrai dire, qu'une ligne inclinée, sur laquelle on fait rouler un mobile : c'est une corde très unie, de vingt ou trente pieds de long, que l'on tend entre deux points fixes, dont l'un est plus bas que l'autre, et sur laquelle on fait rouler un petit char, ou plutôt une poulie de métal convenablement disposée. La pesanteur de la poulie serait complètement détruite si la corde était horizontale; elle aurait toute sa force, si elle était verticale ; et, comme la corde a un certain degré d'inclinaison, la pesanteur de la poulie est réduite dans une certaine proportion. Il est facile de voir par les règles de la statique que sa valeur sur le plan incliné est égale à sa valeur primitive multipliée par le sinus de l'inclinaison du plan. Mais, quel que soit le rapport dans lequel on diminue une force, qu'on la réduise à la moitié, au tiers ou au quart de sa grandeur, on ne change que le mouvement absolu qu'elle imprime, sans rien changer au rapport des espaces parcourus dans des temps donnés. Ainsi, la loi que nous allons observer sur cette corde inclinée sera la vraie loi de la pesanteur. Or, si on laisse couler le char à un instant donné, si l'on note les espaces qu'il parcourt dans la première seconde, dans les deux premières secondes, etc., on trouve que ces espaces parcourus sont entre eux comme les carrés des temps employés à les parcourir. Donc, le mouvement que la pesanteur imprime suit la même loi ; c'est-à-dire, que la pesanteur est une force accélératrice constante (34).

40. *Machine d'Atwood.* Cet appareil est représenté *fig.* 31. Mais, pour la simplicité du raisonnement nous le réduirons à ses élémens essentiels, c'est-à-dire à une poulie parfaitement mobile, sur laquelle passe un fil très fin, qui est tiré à chaque extrémité par le même poids m (*fig.* 32). L'équi-

libre existe quand les deux poids sont au même niveau ; et il existe encore quand l'un est plus haut et l'autre plus bas, comme il est facile de le vérifier par l'expérience. Maintenant, ajoutons d'un côté une petite masse que nous représenterons par n : il est clair que l'équilibre est troublé, que le poids n entraîne le poids sur lequel il repose, et qu'il le force à descendre tandis qu'il force l'autre à monter.

Mais quel est le mouvement qui en résulte ? est-il le même que si le poids n tombait librement, ou bien est-il modifié par les poids opposés qui se meuvent avec lui ?

Les deux masses primitives n'ayant de mouvement que celui que leur donne la masse n, il est évident que celle-ci ne peut leur en donner qu'à ses dépens ; qu'elle perd tout ce qu'elle donne, et qu'ainsi elle tombe moins vite qu'elle ne tomberait si elle était seule. De plus, il est facile de trouver de combien sa chute est ralentie.

Soit g la vitesse qui serait due à la pesanteur après une seconde de temps ; la masse n, si elle était libre, aurait donc au bout d'une seconde cette même vitesse g, et par conséquent une quantité de mouvement gn.

Soit x la vitesse inconnue que prennent en une seconde les deux masses m et la petite masse n en tombant ensemble ; la quantité de mouvement du système sera $x\,(2\,m + n)$, puisque la masse qui se meut est d'une part m et de l'autre $m + n$, dont la somme fait $2\,m + n$. Or, dans une seconde, la masse n reçoit de la pesanteur la même quantité de mouvement, soit qu'elle tombe d'une chute libre, soit qu'elle tombe d'une chute retardée par d'autres masses. Donc,

$$x\,(2\,m + n) = gn\,,\ \text{d'où}\ x = g.\frac{n}{2\,m + n}.$$

C'est, dans la machine d'Atwood, la vitesse du corps qui tombe. Elle est toujours plus petite que g, et peut en être une aussi petite fraction qu'on voudra. Si l'on veut, par

exemple, qu'elle en soit un centième, il suffit de poser

$$\frac{n}{2m+n}=\frac{1}{100}, \text{ d'où } 100\,n=2\,m+n, \text{ et } n=\frac{m}{49,5};$$

c'est-à-dire qu'à chaque instant la vitesse, dans la machine d'Atwood, est la centième partie de la vitesse due à la chute libre, quand la masse additionnelle est la 49,5 partie d'une des masses primitives. En prenant, par exemple, $n=10^{\text{gr.}}$ et $m=495^{\text{gr.}}$, la condition sera remplie.

Il y a un grand avantage à réduire ainsi la vitesse des corps qui tombent, puisque alors on peut négliger complètement la résistance de l'air, et mesurer les espaces parcourus avec beaucoup plus d'exactitude. Cette réduction de la vitesse est le vrai principe de la machine d'Atwood. Voici maintenant sa disposition :

1° Pour éviter le frottement, on fait poser chaque extrémité de l'axe de la poulie sur deux autres poulies plus petites et dont les axes terminés en pivot roulent dans des chapes d'acier ou d'agate (*fig.* 34).

2° Pour mesurer les espaces avec exactitude, on dispose près de la colonne une règle verticale et divisée r, que la masse $m+n$ doit suivre dans sa chute, sans la toucher. Sur cette règle se meuvent deux curseurs : l'un a, en forme d'anneau, pour laisser passer la masse m et pour arrêter la masse n, que l'on fait un peu plus longue; l'autre c, en forme de plan, pour recevoir la masse m et l'arrêter où l'on veut.

3° Pour compter le temps pendant lequel le mobile s'est mu, on adapte près de la machine une horloge à secondes h, et on la fait communiquer à une détente particulière d qui soutient la masse $m+n$ vis-à-vis le sommet de la règle, où se trouve le *zéro* de sa division. A un instant donné, la détente part, le poids tombe, et l'horloge continue de marquer le temps qui s'écoule (*fig.* 31 et 33).

On fait les expériences de la manière suivante : On place

l'anneau de la règle à une hauteur telle, qu'il arrête la masse *n* après une seconde de chute depuis l'instant du départ. Pour cela, on l'élève et on l'abaisse peu à peu, jusqu'à ce que le bruit de la masse *n*, au moment où elle le frappe, coïncide juste avec le battement de l'horloge qui marque la fin de la seconde. Quand *n* est arrêtée, tout le mouvement ne s'arrête pas, car, les masses *m* ont une *vitesse acquise*, en vertu de laquelle elles continuent à se mouvoir : seulement, la pesanteur n'agit plus pour changer leur mouvement; *n* étant enlevée, la force accélératrice est enlevée, et le mouvement qui succède est un mouvement uniforme. Or, d'après ce que nous avons dit (33), la vitesse de ce mouvement uniforme est précisément celle du mouvement accéléré qui avait lieu à la fin de la première seconde, et, pour la trouver, il suffit de placer le curseur *c* de telle sorte que *m* vienne le frapper juste une seconde après que *n* est ôtée, c'est-à-dire deux secondes après le départ de *n*. Alors, la distance des deux curseurs *a* et *c* est l'espace que *m* a parcouru en une seconde en vertu du mouvement uniforme; c'est donc la vitesse de ce mouvement et aussi la vitesse du mouvement accéléré. On fait une deuxième expérience en n'ôtant la masse *n* qu'après deux secondes; on en fait une troisième en ne l'ôtant qu'après trois secondes, et l'on a ainsi la vitesse du mouvement accéléré après une, deux, et trois secondes. On trouve exactement que ces vitesses sont entre elles comme 1, 2, 3; donc, elles croissent proportionnellement au temps, donc le mouvement dont il s'agit est uniformément accéléré.

Ce résultat suffirait pour conclure que l'espace parcouru, en vertu du mouvement uniformément accéléré pendant un certain temps, est moitié de l'espace parcouru dans le même temps par le mouvement uniforme qui lui succède. Mais, on le voit directement, car, dans chacune des expériences précédentes, la distance des curseurs est double de la distance de l'anneau au point de départ.

Pareillement, on pourrait en conclure par le calcul que les espaces sont comme les carrés des temps ; mais il est facile d'imaginer comment on peut le démontrer aussi par le moyen de la machine.

Ces expériences s'accordent avec celles de Galilée, pour prouver que la pesanteur, qui s'exerce à la surface de la terre, est une force accélératrice constante. Déjà, la chute dans le vide a fait voir qu'elle s'exerce également sur toute espèce de corps. Ainsi, toutes les molécules matérielles, quelle que soit leur forme ou leur nature, sont constamment soumises à l'action de cette force.

D'après cela, les lois du mouvement qu'elle imprime sont exprimées par les formules générales du mouvement uniformément accéléré (34),

$$v = gt$$
$$e = \frac{gt^2}{2},$$

dans lesquelles il reste à mettre pour g la valeur qui convient à la pesanteur. On se rappelle que g représente les vitesses que la force accélératrice imprime au mobile pendant l'unité de temps, et l'on se rappelle aussi que cette vitesse est double de l'espace que la force fait parcourir pendant la même unité ; ainsi g est un espace ou une longueur. Nous indiquerons plus tard un moyen très exact d'en trouver la mesure, et nous verrons qu'en prenant la seconde pour unité de temps, la valeur de g est, à Paris,

$$g = 9^m,8088.$$

Avec cette donnée on peut s'exercer à résoudre plusieurs problèmes sur le mouvement des corps pesans.

CHAPITRE III.

Du Centre de Gravité.— De l'Équilibre des Solides.— De la Balance.— Du Poids, de la Masse, et de la Densité des Corps.

41. Un corps pesant, quelque grand ou quelque petit qu'il soit, peut être considéré comme un assemblage d'un nombre infini de points matériels, dont chacun est sollicité par la pesanteur.

Toutes ces forces, quoique en nombre infini, peuvent être remplacées par une force unique, appliquée en un certain point; c'est cette force, qui n'est autre chose que la somme ou la résultante de toutes les actions de la pesanteur, que l'on appelle *le poids* d'un corps, et c'est le point où elle est appliquée qu'on appelle son *centre de gravité*.

Cette définition suffit pour que l'on ne confonde pas la *pesanteur* avec le *poids*, puisque la pesanteur est la force élémentaire qui sollicite chacune des parcelles de la matière en général, tandis que le poids d'un corps est la somme de toutes les actions que la pesanteur exerce sur ce corps en particulier.

Il est très important de savoir déterminer le poids des corps et leur centre de gravité, puisque alors on pourra substituer le poids, qui est une seule force, à toutes les forces élémentaires qui agissent sur un corps; et le centre de gravité, qui est un seul point, à l'ensemble des points qui le constituent; et qu'ainsi une masse pesante, quelles que soient sa grandeur et sa forme, pourra être considérée comme un seul point sollicité par une seule force.

42. *Du Centre de Gravité.* — Dans un corps pesant, qui n'a pas quelques centaines de toises d'étendue, les actions

que la pesanteur exerce sur chaque molécule peuvent être prises pour parallèles, puisqu'elles vont concourir au centre de la terre, et elles sont toutes égales, puisque ces molécules tombent également vite dans le vide ; ainsi le *centre de gravité* n'est autre chose qu'un *centre de forces parallèles et égales*. De là résulte une propriété caractéristique du centre de gravité, c'est que ce point est fixe dans l'intérieur des corps solides, et ne change pas, quelle que soit la position qu'on leur donne à l'égard de la pesanteur. Par exemple, le point *g* (*fig.* 35) étant le centre de gravité du triangle *abc* quand le point *c* est en haut, il sera encore le lieu du centre de gravité quand le point *c* sera en bas, ou dans toute autre position qu'on pourrait lui donner ; car le point d'application de la résultante des forces parallèles est indépendant de la direction de ces forces (21).

Pour qu'un corps pesant soit en équilibre, il n'y a qu'une seule condition essentielle à remplir : c'est que le centre de gravité soit soutenu. Par conséquent, si le centre de gravité est lui-même un point fixe, on pourra tourner le corps de toutes les manières possibles, il restera toujours en repos, parce qu'il sera toujours en équilibre. On en peut faire l'expérience avec un disque homogène, tournant autour d'un axe horizontal qui passe par le centre. Lorsqu'un corps est soutenu par un point fixe qui n'est pas le centre de gravité, l'équilibre est encore possible, mais il n'a plus lieu que dans deux positions seulement, savoir, quand le centre de gravité est dans la verticale du point fixe, soit au-dessus, soit au-dessous de ce point. On en peut faire l'expérience avec un disque homogène tournant autour d'un axe horizontal et excentrique.

C'est de cette considération que l'on tire un moyen expérimental de trouver le centre de gravité d'un corps. On l'attache avec un fil en un point *c* de sa surface (*fig.* 36), on le suspend, et, quand il est en repos, on marque avec autant d'exactitude qu'il est possible, le point *m* où le pro-

longement du fil viendrait percer la surface inférieure ; le centre de gravité est nécessairement sur la ligne *cm*. Ensuite on recommence l'expérience, en attachant le corps par un autre point *a*, et en marquant de même le point *m'* correspondant ; le centre de gravité est aussi dans la ligne *am'*. Donc, il se trouve à la rencontre de deux lignes *cm* et *am'*.

Pour des corps très lourds, on pourrait faire l'expérience en sens contraire , en les tournant sur leurs arêtes ou en les posant sur des supports de petite étendue. Mais, pour les corps homogènes qui ont des formes régulières, on détermine leur centre de gravité par des considérations géométriques assez simples.

Ligne droite. — Le centre de gravité est évidemment au milieu de la longueur.

Cylindre à bases parallèles. — Le centre de gravité est au milieu de l'axe (*fig.* 42, 43 et 44).

Parallélogramme. — Le centre de gravité est à la rencontre des diagonales, car chaque diagonale coupe la figure en deux parties égales. Il en est de même pour un parallélogramme creux, comme un cadre.

Cercle. — Le centre de gravité est au centre du cercle ; ce point est pareillement le centre de gravité de la circonférence et celui de l'anneau compris entre deux circonférences concentriques (*fig.* 45).

Triangle. — On mène les lignes *de*, *fg*, etc., parallèlement à la base (*fig.* 37), ensuite la ligne *am* qui coupe en deux parties égales cette base et toutes ses parallèles ; on achève les parallélogrammes *dbce*, *hkli*, etc., par des lignes parallèles à *am*. La ligne *am* passe par le centre de gravité de tous les parallélogrammes extérieurs , et aussi par les centres de gravité de tous les parallélogrammes intérieurs au triangle ; et elle y passe , quelle que soit la grandeur que l'on donne à ces parallélogrammes. Or, comme ils sont, les uns circonscrits au triangle, les autres inscrits, et, comme à leur limite de petitesse ils finissent par se con-

fondre avec lui, il faut bien aussi que le centre de gravité du triangle soit sur *am*; pareillement, il doit être sur *bm'* (*fig.* 38), donc il est en *g* à leur rencontre; et il résulte des triangles semblables *abg* et *mgm'* que *mg* est la moitié de *ag*, ou que le point *g* est aux deux tiers de *am*, à partir du point *a*.

Polygones. — On les décompose en triangles (*fig.* 39), dont on cherche les centres de gravité; ensuite, on regarde les forces appliquées aux centres de gravité des triangles comme étant proportionnelles à leurs surfaces, on en cherche la résultante par les règles ordinaires, et son point d'application est le centre de gravité.

Pyramide triangulaire. — On mène une ligne du sommet *s* (*fig.* 40) au point *g*, centre de gravité de la base *abc*; et on démontre aisément, en faisant des tranches inscrites et circonscrites, comme pour les triangles, que le centre de gravité est sur cette ligne *sg*; qu'il est pareillement sur *sg'*, et qu'ainsi il est en *g''* à leur rencontre. Ensuite, on conclut, par la comparaison des triangles semblables, que ce point *g''* est aux trois quarts de *sg*, à partir du sommet. Une pyramide quelconque se décompose en pyramides triangulaires, et on arrive à cette conséquence, que, dans tous les cas, le centre de gravité d'une pyramide est sur la ligne qui joint son sommet au centre de gravité de sa base, et qu'il est aux trois quarts de cette ligne, à partir du sommet.

Polyèdre. — On le décompose en pyramides, comme le polygone se décompose en triangles.

Cône. — C'est comme une pyramide (*fig.* 41).

Sphère. — Le centre de gravité est au centre de la sphère; de même pour une surface sphérique; de même pour une couche comprise entre deux sphères concentriques.

43. *De l'équilibre.* — Nous avons déjà vu que la seule condition d'équilibre d'un corps pesant est que son centre de gravité soit soutenu; mais cette condition se remplit de di-

verses manières, suivant que le corps est suspendu à des points fixes, ou posé sur des appuis.

1° Supposons, par exemple, un disque homogène (*fig.* 46) percé de trois trous égaux, *a*, *b*, *c*, et dont le centre de gravité soit au centre de figure: ce disque sera en équilibre dans toutes les positions autour d'un axe passant par le trou central *a*, et cet équilibre s'appelle *indifférent*; si l'axe passe par le trou supérieur *b*, l'équilibre est *stable*, parce que le corps tend à y revenir quand on l'en écarte; on voit en effet qu'en faisant un peu tourner le disque autour de cet axe, le centre de gravité se déplace à droite ou à gauche sur l'arc *mn*. Il n'est plus soutenu puisqu'il n'est plus dans le plan vertical de l'axe de suspension, et il descend pour revenir, après une série d'oscillations, s'arrêter dans ce plan; si l'axe passe par le trou inférieur *c*, le disque peut encore mathématiquement être en équilibre; cela aura lieu si le centre de gravité se trouve exactement dans le plan vertical de l'axe, mais, c'est un équilibre *instable*, parce qu'au moment où le centre de gravité sort de ce plan, il s'en écarte de plus en plus et décrit une demi-circonférence entière pour venir s'arrêter au-dessous de l'axe de suspension.

En généralisant ces résultats, on voit qu'un corps quelconque, suspendu par un axe, peut être en équilibre stable, instable ou indifférent, suivant que son centre de gravité est au-dessous de l'axe, au-dessus de l'axe ou dans l'axe lui-même.

2°. Examinons ce qui arrive à un disque simplement posé sur un plan horizontal ou incliné, et supposons que ce disque composé, par exemple, de plomb et de bois, ait son centre de gravité sur la circonférence *a d b* (*fig.* 47) à une distance assez grande de son centre de figure. Il résulte de ce qui précède qu'il y aura seulement deux positions d'équilibre: l'une stable quand le centre de gravité sera en *a*, l'autre instable quand le centre de gravité sera en *b*. Si ce même disque est posé sur un plan incliné (*fig.* 48), il y aura encore équilibre quand le centre de gravité se trouvera dans le plan vertical *pb*

mené par l'arête *p* du contact, la stabilité correspondant toujours au point le plus bas *a* et l'instabilité au point le plus élevé *b*.

Dans ce dernier cas, si le disque est poussé un peu en avant ou à droite, il tournera en remontant le plan sur une longueur égale à l'arc *p g v*, et il sera alors dans sa position de stabilité.

Lorsque les corps reposent sur le sol par une base plus ou moins large, il est nécessaire, pour l'équilibre, que la verticale du centre de gravité tombe dans l'enceinte de cette base. On voit d'après cela que le cylindre oblique (*fig.* 49) sera en équilibre s'il n'a qu'une longueur *ab*, et qu'il tombera si on le surmonte d'un cylindre pareil qui déplace le centre de gravité au point de le porter en dehors des verticales du contour de la base.

44. Les conditions d'équilibre, telles qu'on les donne habituellement et telles que nous venons de les établir, ne sont réellement suffisantes que dans les spéculations de la théorie, car elles supposent à la matière une propriété dont elle ne jouit pas ; elles supposent que tous les corps sont parfaitement rigides, c'est-à-dire, qu'ils ne sont ni élastiques, ni compressibles, et que leurs molécules ont, à l'égard l'une de l'autre, une immobilité absolue. En effet, concevons un long tube de verre mince, posé par son milieu sur un appui quelconque (*fig.* 50) : son centre de gravité sera soutenu, et cependant l'équilibre n'aura pas lieu, car il fléchira en vertu de son élasticité ; il fléchira d'autant plus que l'on chargera ses extrémités d'un poids plus considérable ; il en est de même d'un arbre soutenu sur ses coussinets (*fig.* 51) : il fléchit toujours plus ou moins, suivant son poids, son élasticité, sa ténacité, et suivant les pressions qu'il supporte. Ce qui est vrai des corps inorganiques l'est à plus forte raison des corps organisés, qui sont bien moins tenaces et bien plus élastiques. Une plante est soutenue, parce que la verticale de son centre de gravité tombe dans l'enceinte qui

est déterminée par ses racines ; mais cela n'empêche pas que les rameaux ne fléchissent par leur propre pesanteur, et que la tige elle-même ne puisse fléchir et se rompre par la même cause. Un éléphant est soutenu, parce que la verticale de son centre de gravité tombe dans l'enceinte des quatre colonnes qui supportent sa masse ; mais il faut, en outre, que les vertèbres et les côtes soient assez fortement articulées pour porter un tel poids, et que les muscles et la peau puissent résister à la pression qu'ils en éprouvent.

On comprend pareillement que les changemens de forme qui résultent, soit de l'élasticité, soit de la compressibilité, soit des mouvemens volontaires qui déplacent les membres et les organes, sont autant de causes qui font varier le centre de gravité. Quand un homme lève le bras, son centre de gravité change de place ; quand un oiseau allonge le cou, son centre de gravité est très sensiblement porté en avant. On voit (*fig.* 52) les quatre positions du centre de gravité d'un oiseau dans les quatre situations principales de la marche, du repos, de la nage et du vol.

45. *De la Balance.* — La balance ordinaire se compose d'un fléau *a b* (*fig.* 61), soutenu par son milieu *m*, et dont les bras *a m* et *b m* sont destinés à porter les bassins *c d*, très mobiles autour de leurs points d'attache. Après avoir équilibré ces bassins, on met dans l'un d'eux le corps à peser, et dans l'autre des poids marqués, jusqu'à ce que l'équilibre soit établi, c'est-à-dire jusqu'à ce que le fléau soit parfaitement horizontal. Alors, si la balance est juste, le poids du corps est exprimé par le nombre des grammes et fractions de gramme qu'il a fallu mettre dans l'autre bassin : mais, si la balance n'est pas juste, si ses deux bras ne sont pas mathématiquement égaux, il est évident que le poids du corps n'est plus représenté par les grammes qui lui font équilibre dans l'autre bassin ; car les poids sont entre eux en raison inverse du bras de levier, ou des bras de la balance, et ils ne sont égaux que quand les bras sont égaux.

Comme il est à-peu-près impossible de faire une balance dont les bras soient parfaitement égaux, on a imaginé diverses méthodes pour remédier à cet inconvénient. La plus simple est la *méthode des doubles pesées* ou des *pesées par substitution*. Elle consiste à équilibrer le corps avec du plomb, du sable ou d'autres objets, puis à retirer le corps quand l'équilibre est établi, et à lui substituer les grammes et fractions de gramme qui sont nécessaires pour rétablir l'équilibre. Les poids marqués prenant ainsi la place du corps à peser, l'inégalité des bras ne peut plus avoir d'influence.

La balance ordinaire dont nous venons de parler peut servir lorsqu'on ne veut atteindre qu'à une approximation d'environ 1 décigramme.

Pour les pesées très exactes, il faut employer une balance plus parfaite, qui trébuche aisément à 1 milligramme lorsqu'elle est chargée de 1 kilogramme dans chaque bassin. Voici les principales conditions au moyen desquelles on arrive à ce résultat.

1° Le fléau *f* (*fig.* 54, 59 et 60) est traversé par un couteau d'acier *a* (*fig.* 54) dont le tranchant, aigu sans être vif, repose sur des plans *b*, d'acier ou d'agate; de cette manière, le contact du fléau sur les supports ne change pas, et il n'éprouve que le moindre frottement possible.

2° Les deux bassins *c* (*fig.* 55 et 60) s'attachent au fléau au moyen du crochet *d* et de la griffe *g* qui va reposer sur le tranchant du couteau *h*. Tous ces points de contact sont à arêtes mousses et en acier; il en résulte que le centre de gravité de chaque bassin et des poids qu'il contient se place librement dans la verticale du tranchant du couteau *h*, et que la distance de ce tranchant au tranchant de la suspension reste invariable pendant les oscillations de la balance.

3° Le centre de gravité du fléau peut être élevé ou abaissé au moyen de l'écrou *l* (*fig.* 53, 59 et 60) qui se meut sur la vis *p*. Le poids de cet écrou et la longueur de la vis sont tellement combinés, qu'en donnant successivement à l'écrou les

trois positions *i, k, l,* le centre de gravité du fléau se trouve successivement aux trois points *m, n, o*. Dans le premier cas, l'équilibre est instable et la balance est folle; dans le deuxième cas, l'équilibre est indifférent; enfin, dans le troisième cas, l'équilibre est stable, et le fléau accomplit une série d'oscillations plus ou moins rapides, suivant que le centre de gravité est plus ou moins abaissé au-dessous du tranchant du couteau. On voit en même temps que si l'équilibre n'est pas rigoureusement établi, s'il manque par exemple 1 milligramme dans l'un des bassins, le fléau penchera du côté du poids le plus fort, et que pour la même différence de 1 milligramme il penchera d'autant plus que le centre de gravité sera moins abaissé au-dessous du tranchant du couteau. Au moyen de l'écrou *l*, on peut donc à volonté augmenter ou diminuer la sensibilité de la balance. Pour apprécier d'une manière plus exacte, soit l'inclinaison du fléau, soit l'amplitude des oscillations, on y adapte une longue aiguille *r* (*fig.* 54 et 60) qui se meut sur une division circulaire *s* dont le centre est sur le tranchant du couteau *a*.

4° Pour conserver le poli du couteau de suspension *a* et les plans sur lesquels il repose, on adapte à la balance un système de fourchettes *t* (*fig.* 56 et 60), qui viennent saisir le fléau par-dessous, et qui le maintiennent soulevé pendant que l'on change les poids des bassins; puis, en laissant doucement redescendre les fourchettes, le couteau vient se reposer sur ses plans, et le fléau peut faire des oscillations plus ou moins grandes suivant que les fourchettes ont été plus ou moins abaissées. La figure 56 représente le moyen de régler la hauteur des fourchettes pour qu'elles prennent et quittent le fléau en même temps. La figure 53 représente la colonne mobile *u*, dont la partie supérieure est munie de deux bras *v* destinés à porter les fourchettes, tandisque la partie inférieure se termine par un galet reposant sur le plan incliné *x* (*fig.* 53, 57 et 58); ce plan incliné se meut autour du centre *y* au moyen de la manivelle *z* : quand on tire la manivelle en

avant, le plan incliné soulève le galet, la colonne u, les bras vx, les fourchettes t, et par conséquent le fléau f : au contraire, quand on pousse la manivelle en arrière, le plan incliné recule, et le ressort à boudin qui enveloppe la colonne u ajoute son effet au poids du fléau pour forcer la colonne à descendre avec ses fourchettes et pour amener le couteau du fléau reposer sur ses supports.

Les balances exécutées d'après ces principes ont une justesse et une sensibilité qui ne laissent rien à désirer.

46. *Du Poids, de la Masse, et de la Densité.* — Le gramme, qui est l'unité de poids adopté en France, est le poids d'un centimètre cube d'eau distillée prise au maximum de condensation. Si la longueur du centimètre se perdait, on pourrait la retrouver puisqu'elle est la centième partie du mètre ; et, si le mètre lui-même venait à se perdre, on pourrait le retrouver aussi puisqu'il est la dix-millionième partie de l'arc méridien de Paris compris entre le pôle et l'équateur, il suffirait de recommencer la mesure de la terre. Enfin, si la terre elle-même venait à changer de forme ou de grandeur, alors le mètre serait changé ; on ne pourrait plus en retrouver la longueur : mais en même temps tout serait changé pour nous ; les jours et les nuits n'auraient plus les mêmes périodes, ni les saisons le même cours et la même durée ; l'unité de poids serait elle-même altérée, et elle le serait encore si l'eau pouvait changer de composition, ou si la pesanteur pouvait changer d'action. Ainsi, tout est conditionnel dans nos principes les plus fondamentaux, et la science a fait tout ce qu'elle pouvait faire quand elle a établi ses bases sur la stabilité du monde.

On dit communément que la *masse* d'un corps est la quantité de matière qui le compose ; mais, cette définition serait tout-à-fait illusoire, si nous n'avions pas quelque moyen de comparer les quantités de matière et d'établir leurs rapports.

C'est en vain que l'on chercherait quelque caractère extérieur pour juger de la quantité de matière qui est con-

tenue dans un espace donné ; on n'y arriverait jamais, s'il n'y avait dans la nature quelque force particulière qui remplît les conditions suivantes : 1° qui sollicitât également tous les atomes des corps, et 2° qui fût telle que l'on pût en obtenir la résultante. Or, la pesanteur est une force de cette espèce ; elle agit également sur toutes les substances, puisque toutes, dans leur chute, prennent la même vitesse, et on peut connaître sa résultante sur un corps donné, puisque cette résultante est le poids du corps. C'est d'après cette vérité d'expérience qu'il est permis de conclure que *la masse ou la quantité de matière est proportionnelle au poids.* Sur quoi il faut remarquer qu'il y a deux manières d'évaluer le poids d'un corps. On peut l'évaluer au moyen de la balance, comme nous venons de l'indiquer ; alors le poids est indépendant de l'intensité de la pesanteur. Par exemple, si une balance est en équilibre à Paris, ayant une certaine quantité de fer dans un de ses plateaux et dans l'autre des poids de cuivre de la valeur d'un kilogramme, elle serait encore en équilibre au sommet des Alpes, quoique au sommet des Alpes la pesanteur fût moindre qu'à Paris. Cela est ainsi, parce que le fer, le cuivre et toutes les substances, gagnent du poids ou en perdent dans le même rapport, quand la pesanteur augmente ou quand elle diminue ; la même balance serait encore en équilibre si on la portait aux limites de l'atmosphère, ou à la surface de la lune, ou même jusqu'à la surface du soleil. Au contraire, si l'on voulait évaluer les poids au moyen d'un ressort gradué qui fléchît d'une certaine quantité, le volume de fer, qui à Paris marquait un kilogramme, ferait bien moins fléchir le ressort au sommet des Alpes, et le ferait fléchir vingt-six ou vingt-sept fois davantage à la surface du soleil ; son poids évalué de cette manière changerait donc avec la pesanteur, et cependant sa masse ne changerait pas. Le poids donné par la balance peut être appelé poids relatif ; celui qui est donné par le ressort peut être appelé poids absolu : alors il est vrai de dire que *la masse*

d'un corps est proportionnelle à son poids relatif, ou bien qu'elle est proportionnelle à son poids absolu divisé par l'intensité de la pesanteur.

Il se pourrait qu'il y eût dans la nature des substances *impondérables*, sur lesquelles la pesanteur n'exerçât aucune espèce d'action; ces substances sans pesanteur seraient aussi sans poids, mais elles ne seraient pas sans masse. Seulement, toute comparaison serait impossible entre elles et les masses pesantes, tant qu'on n'aurait pas découvert quelque force, ou instantanée ou constante, qui pût agir sur les substances des deux espèces. Une substance impondérable, qui serait agrégée à la matière pesante pour constituer les corps, deviendrait une cause capable de retarder les mouvemens dus à la pesanteur; elle agirait comme les masses *m* qui se font équilibre dans la machine d'Atwood, car elle partagerait le mouvement imprimé par la gravité. De ce qu'on n'observe aucun retard de cette espèce, on n'en peut pas conclure qu'il n'y a pas dans les corps des substances impondérables, mais seulement que, s'il y en a, elles y sont en masse très petite à l'égard de la masse pondérable, ou qu'elles n'y sont pas agrégées d'une manière permanente, mais que les corps pesans la quittent quand ils se déplacent.

La densité d'un corps est égale au rapport de son poids à son volume (*); ce rapport est très essentiel à considérer; il est pour chaque substance une propriété permanente, et souvent même il devient une propriété caractéristique. Un centimètre cube d'eau distillée à Paris pèse un gramme, c'est là notre définition, et le même volume d'eau pèse le même poids dans tous les pays du monde; un centimètre cube de fer pèse $7^{g},8$, soit qu'on l'ait tiré des mines de Suède, de France ou d'Amérique, et quelles que soient les combi-

(*) La densité s'appelle aussi *pesanteur spécifique* : pour que cette expression soit juste, il faut entendre que *pesanteur spécifique*, ou *pesanteur sous un volume donné*, signifie *poids sous un volume donné*.

naisons desquelles on l'ait dégagé pour l'avoir pur; pareillement un centimètre cube d'or pèse 19g,258, soit qu'on l'ait tiré des mines du Pérou ou de celles du Japon. Le poids, sous un volume donné, c'est-à-dire la densité, est donc une propriété très fixe dans chaque substance; bien entendu qu'il faut prendre le volume à la même température; car nous avons vu que la chaleur dilate tous les corps. Nous apprendrons plus tard à déterminer les densités; pour le moment, nous les supposerons connues et nous apprendrons seulement à nous en servir. De la définition que nous en avons donnée il résulte :

1°. Qu'à volume égal les densités des corps sont proportionnelles à leurs poids;

2°. Qu'à poids égal les densités sont en raison inverse des volumes;

3°. Qu'en général les densités sont comme le rapport direct des poids, multiplié par le rapport inverse des volumes;

4°. Que le poids relatif d'un corps est égal à son volume multiplié par sa densité;

5°. Que le volume d'un corps est égal à son poids relatif divisé par sa densité.

Il importe d'avoir compris ces sortes de formules et d'en avoir fait plusieurs applications pour les avoir bien présentes à l'esprit.

CHAPITRE IV.

Du Pendule.

47. Le pendule ordinaire se compose d'un boule pesante suspendue à l'extrémité d'un fil flexible (*fig.* 62). Ses propriétés les plus fondamentales sont : 1° de marquer la direction verticale ou celle de la pesanteur ; 2° de faire des oscillations planes quand on l'écarte de la verticale, et qu'on l'abandonne à lui-même sans lui donner aucune impulsion. En effet, si on met le pendule dans une position quelconque *fa*, et qu'on le laisse tomber librement, il descend jusqu'en *l*, dépasse ce point, remonte de l'autre côté jusqu'en *b*, en décrivant un arc *lb* égal à l'arc *la*, ensuite il tombe de nouveau, arrive en *l*, remonte en *a*, et continue ainsi son mouvement pendant très long-temps. On peut remarquer que, quand le pendule descend, la vitesse va en augmentant jusqu'en *l*, et qu'au contraire quand il remonte, elle va en décroissant depuis le point *l* jusqu'au point où il s'arrête.

L'angle *afl* s'appelle *l'angle d'écart*, ou simplement *l'écart*.

Le mouvement de *a* en *b* ou de *b* en *a* est ce qu'on appelle une *oscillation*, de *a* en *l* une *demi-oscillation descendante*, et de *l* en *b* une *demi-oscillation ascendante*.

L'*amplitude* de l'oscillation est l'arc *ab* mesuré en degrés, minutes et secondes.

La *durée* d'une oscillation est le temps que le pendule met à parcourir cet arc.

La première conséquence qui se présente après ces observations, c'est que le mouvement du pendule est le mouvement perpétuel, car si, en partant de *a*, il remonte à une hauteur

b qui soit la même, il faut aussi qu'en partant de *b* il revienne exactement en *a;* et, ce qu'il a fait la première fois, il le fera la seconde, la troisième, et ainsi de suite perpétuellement.

Cette conclusion serait de toute rigueur, si en effet la hauteur du point *b*, où il arrive, était exactement égale à la hauteur du point *a*, d'où il est parti; mais les frottemens du point de suspension *f*, et la résistance de l'air que la boule doit pousser devant elle, empêchent que cette égalité ne soit absolue. La différence ne devient sensible qu'après un certain nombre d'oscillations, et, loin de s'étonner que le mouvement ne soit pas perpétuel, on s'étonne qu'il puisse se continuer pendant si long-temps : car un pendule peut, sans s'arrêter, faire des oscillations pendant des heures entières.

Le pendule est un des instrumens les plus simples de la physique, et cependant il est un des plus curieux à étudier, parce qu'il sert à la mesure exacte du temps, à la détermination de la figure de la terre, et à l'une des questions les plus importantes sur la gravitation générale de la matière.

48. *Lois des oscillations du Pendule.* — 1° La durée des oscillations qui sont *très petites* est indépendante de leur amplitude ; on dit qu'elles sont *isochrones*, pour exprimer qu'elles se font toutes dans le même temps. Les oscillations de 4 ou 5 degrés d'amplitude ne sont plus des oscillations très petites, elles commencent à avoir une durée sensiblement plus grande.

2°. La durée des oscillations est tout-à-fait indépendante du poids de la boule et de la nature de sa substance.

3°. Les durées des oscillations sont entre elles comme les racines carrées des longueurs des pendules.

Ces lois se déduisent rigoureusement des principes de mécanique, mais, en physique, on les démontre approximativement par l'expérience.

La première loi exigerait trop de temps pour qu'on essayât

de la démontrer dans un cours, puisqu'il faudrait compter plusieurs centaines d'oscillations : les unes au commencement, quand l'amplitude est de 4 ou 5 degrés ; les autres un peu plus tard, quand elles sont réduites à 2 ou 3 degrés ; et les dernières vers la fin du mouvement, quand elles ne sont plus sensibles à l'œil, et qu'il faut les observer avec une lunette. On s'étonne d'abord que le pendule mette presque autant de temps à parcourir un arc de $\frac{1}{10}$ de degré qu'à parcourir un arc de 10 degrés, qui est par conséquent cent fois plus grand ; mais on en conçoit la raison en observant que, dans le deuxième cas, la pesanteur lui imprime beaucoup plus de vitesse, parce qu'elle agit plus obliquement et d'une manière plus efficace. Cette *loi de l'isochronisme* est une des premières découvertes de Galilée : on rapporte que, étant très jeune encore, il vit par hasard dans l'église métropolitaine de Pise, les balancemens d'une lampe suspendue à la voûte, et qu'il resta très frappé des retours périodiques de ces mouvemens et de l'égalité de leur durée. Il n'en fallut pas davantage pour éveiller son génie, et cette observation d'un enfant devint la source des plus grandes découvertes.

La seconde loi se démontre facilement :

On prend différentes boules, de métal, d'ivoire, ou d'autres substances ; on en compose des pendules de même longueur, que l'on fait osciller ensemble, et l'on voit que tous ces pendules restent d'accord pendant très long-temps.

Quand la pesanteur agit pour faire osciller un pendule, elle agit séparément sur chacun des atomes de matière qui composent la boule : ainsi, un seul atome de fer, par exemple, suspendu à l'extrémité du fil, doit osciller avec la même vitesse que deux atomes pris ensemble, puisqu'ils ont leur force séparée, et que cette force a pour chacun d'eux la même intensité ; il doit osciller comme le ferait une réunion quelconque d'atomes, et en effet, sans les résistances et les frottemens, il oscillerait comme une grande boule de fer. De plus, la pesanteur agissant de la même manière sur toutes

les substances, un atome de fer doit osciller comme un atome d'ivoire, d'or, ou de platine; et par conséquent toutes les masses, quelle que soit leur nature, doivent osciller avec la même vitesse. Cette expérience est importante, puisqu'elle donne une autre preuve que la pesanteur agit de la même manière sur tous les corps. L'expérience que nous en avons déjà faite dans le tube vide d'air n'est qu'une expérience grossière, puisque la pesanteur n'agit que pendant quelques fractions de secondes, tandis qu'avec le pendule nous pouvons observer ses effets sur les différens corps pendant des heures entières. Ils ne tombent, il est vrai, que dans l'arc d'oscillation, qui se replie sur lui-même un grand nombre de fois; mais il est évident que, pour la conséquence qui nous occupe, c'est comme s'ils tombaient d'un mouvement rectiligne et progressif. C'est par des observations de cette espèce, mais qui exigeraient beaucoup de soins et de précision, que l'on pourrait découvrir s'il existe en effet, dans l'intérieur des corps, quelque substance impondérable, agrégée d'une manière permanente à la matière pondérable, et ayant, par rapport à elle, une masse sensible à volume égal. On ne peut rien déduire des observations de Mairan sur ce sujet; elles n'ont point été faites dans cette vue, et elles datent d'une époque où l'on aurait vainement cherché le degré de précision auquel on peut atteindre aujourd'hui.

La troisième loi se démontre avec des pendules de diverses longueurs : si, par exemple, on prend trois pendules, dont les longueurs soient entre elles comme les nombres 1, 4, 9, alors les durées des oscillations doivent être comme les nombres simples 1, 2, 3; et, en effet, si l'on fait osciller de tels pendules, soit en les suspendant au devant l'un de l'autre, soit en les ajustant par un double fil (*fig.* 63), on compte facilement que celui dont la longueur est 1, comparé à celui dont la longueur est 4, fait deux oscillations pour une, et qu'il en fait trois pour une quand on le compare à celui dont la longueur est 9. Ce n'est que par des considérations méca-

niques que l'on peut se rendre un compte exact de ce résultat important.

49. *De l'Intensité de la Pesanteur, du Pendule simple, du Pendule composé.* — Les lois dont nous venons de parler sont tout-à-fait indépendantes de l'intensité de la pesanteur. Supposez que cette force devienne cent fois plus intense ou cent fois plus faible, les petites oscillations seraient encore isochrones entre elles, et leur durée conserverait encore le même rapport avec les poids des pendules et avec leurs longueurs. Mais, bien que ces lois ne changent pas avec l'intensité de la force, il y a cependant quelque chose qui change, c'est la durée absolue de chaque oscillation. Si la pesanteur cessait d'agir à un instant donné, les corps cesseraient de tomber, et les pendules cesseraient d'osciller; ou, du moins, les corps ne tomberaient plus qu'en vertu de leur vitesse acquise, et les pendules qui sont actuellement en mouvement décriraient des cercles entiers, sans être rappelés dans la verticale et sans être arrêtés par autre chose que par le frottement. Au contraire, si la pesanteur venait à doubler d'intensité, les corps tomberaient plus vite, et les pendules seraient plus prompts dans les retours de leurs battemens.

Mais, le vrai rapport qui existe entre la durée des oscillations, la longueur du pendule et l'intensité de la pesanteur, ne peut être démontré que par les lois de la mécanique, et nous devons nous borner à rapporter ici la formule qui sert à l'exprimer.

Soit l la longueur d'un pendule quelconque, exprimée en mètres;

Soit t la durée d'une oscillation de ce pendule, exprimée en secondes sexagésimales;

Soit π le rapport approché de la circonférence au diamètre, dont la valeur est comme on sait $\pi = 3,1415926$;

Enfin, soit g l'intensité de la pesanteur, c'est-à-dire le nombre de mètres qui exprime la vitesse d'un corps, après une seconde de chute libre.

On aura pour la formule du pendule :

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}; \text{ d'où } g = \frac{\pi^2 l}{t^2};$$

c'est-à-dire que l'intensité absolue de la pesanteur est égale au carré du rapport approché de la circonférence au diamètre, multiplié par la longueur du pendule qu'on observe, et divisé par le carré du temps d'une oscillation.

Pour avoir l'intensité de la pesanteur, il suffira donc de faire osciller un pendule, d'en mesurer la longueur pour avoir l, d'observer la durée d'une oscillation pour avoir t, et de faire ensuite les calculs indiqués.

Cette formule est celle qui convient au pendule *simple;* on appelle ainsi un pendule idéal, qu'il est facile de concevoir, mais qu'il est impossible de construire. Il se composerait d'un fil inextensible et sans pesanteur, à l'extrémité duquel serait fixée une seule molécule de matière pesante.

50. Tout pendule qui n'est pas simple, comme le précédent, s'appelle *pendule composé :* ainsi un fil inflexible et sans pesanteur, auquel seraient attachées seulement deux molécules pesantes, m et n (*fig.* 64), formerait un pendule composé. Dans cet appareil, la vitesse d'oscillation se *compose* en effet des vitesses d'oscillation que prendrait séparément chacune des petites masses, en oscillant librement. La molécule m, qui n'est qu'à la distance fm du point de suspension, tend à osciller plus vite que la molécule n, qui en est à la distance fn; mais, puisqu'elles sont liées l'une à l'autre, forcées de marcher ensemble et d'accomplir leur oscillation dans le même temps, la première est retardée par la seconde, et la seconde accélérée par la première; de là, une vitesse intermédiaire, qui est la vitesse du pendule composé. Dans tout corps qui oscille, il se fait une compensation analogue entre toutes les vitesses différentes que prendraient les diverses molécules, si chacune d'elle oscillait librement. Pour faire mieux entendre cette vérité fondamentale, nous pren-

drons encore un exemple : *fp* (*fig.* 65) représente un pendule ordinaire, tel à-peu-près que ceux qui servent de régulateurs aux horloges ; *f* est le point fixe, *ft* est ce qu'on appelle la tige, et *l* la lentille. Le point *m*, et ceux qui sont comme lui très voisins de l'axe de suspension, marcheraient très vite, s'ils étaient seuls. Au contraire, le point extrême *n* et ceux qui sont comme lui très bas, ne pourraient marcher que très lentement. Les premiers sont donc retardés par l'effort qu'ils font pour entraîner les derniers, et ceux-ci sont accélérés par l'impulsion qu'ils en reçoivent. Donc, entre le point *m* et le point *n* il y a un certain point *c*, qui n'est, lui, ni retardé ni accéléré, et qui fait son oscillation exactement comme s'il était seul, et librement suspendu à l'extrémité du fil *fc;* ce point remarquable est appelé le *centre d'oscillation.* Dans tout pendule composé, il se trouve nécessairement un ou plusieurs centres d'oscillation, et leur distance *commune* au point de suspension est ce que l'on nomme la *longueur du pendule.* Cette longeur est en effet égale à celle du pendule simple, qui oscillerait avec la même vitesse que le pendule composé. Le centre d'oscillation dépend de la forme du corps qui oscille, quand ce corps est homogène ; et il dépend de sa forme et de la densité de ses parties, quand il est hétérogène. Un pendule tout en cuivre aurait, par exemple, son centre d'oscillation en *c* (*fig.* 65) quand sa tige serait très épaisse, et en *d*, si elle se réduisait à un fil. Un petit poids que l'on ajouterait vers l'extrémité inférieure *n* ferait descendre encore le centre d'oscillation, et il le ferait remonter si on l'ajoutait vers le haut. Aussi voit-on, dans quelques horloges, un *curseur* pesant, qui peut glisser le long de la tige du pendule, et que l'on fait descendre ou monter pour faire retarder ou avancer l'horloge ; mais le plus souvent cet effet se produit par la lentille elle-même, qui peut être relevée ou rabaissée par un petit mouvement de vis.

Les oscillations d'un poids suspendu à un fil vertical, et

les oscillations du balancier qui règle le mouvement des montres (*fig.* 66), s'accomplissent aussi suivant les lois du pendule composé ; mais la force agissante est, dans le premier cas, l'élasticité de torsion du fil, et, dans le deuxième cas, l'élasticité du ressort spiral, mise en jeu par les impulsions de la roue de rencontre.

Puisque nous ne pouvons employer que des pendules composés, on voit, d'après ce qui précède, que, pour déterminer l'intensité de la pesanteur par les observations du pendule, il se présente deux grandes difficultés : Premièrement, celle d'observer avec précision la durée d'une oscillation ; secondement, celle de déterminer avec exactitude la longueur du pendule que l'on fait osciller : car, ce n'est qu'après avoir trouvé ces deux élémens essentiels, que le pendule composé peut être *ramené* au cas du pendule simple, et qu'il est permis d'employer la formule $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, pour en tirer la valeur g de l'intensité de la pesanteur.

Borda est le premier physicien qui nous ait donné une méthode exacte pour mesurer le pendule : il avait le génie des recherches de cette espèce, car il avait le génie de la précision. Ses expériences furent faites, en 1790, à l'Observatoire de Paris, et l'on peut dire qu'avant cette époque il n'y avait pas un lieu de la terre où la force de la pesanteur fût connue. MM. Biot, Bouvard et Mathieu ont répété les mêmes expériences en 1808, d'après les procédés de Borda et avec des instrumens analogues. En 1818, M. Arago et M. de Humbolt en ont fait encore une vérification par d'autres procédés. Toutes ces expériences confirment l'exactitude de celles de Borda, et il en résulte enfin que l'intensité de la pesanteur est, à Paris, telle qu'il l'avait trouvée, savoir de $9^m,8088$. C'est-à-dire qu'un corps qui tombe dans le vide pendant une seconde,

acquiert une telle vitesse que, si la pesanteur cessait d'agir sur lui, il parcourrait $9^m,8088$ dans toutes les secondes suivantes. Ce qui peut s'exprimer encore en disant qu'un corps qui se meut dans le vide, en partant du repos, parcourt en 1″ un espace qui est de $4^m,9044$, car nous avons vu que la vitesse qui a lieu après l'unité de temps est double de l'espace parcouru pendant cette unité.

On trouvera, dans le tableau qui termine ce chapitre, l'ensemble des observations du pendule qui ont été faites dans les diverses régions de la terre, et il sera facile d'en déduire l'intensité de la pesanteur à chaque station, au moyen de la formule

$$g = \frac{\pi^2 l}{t^2}$$

Connaissant en effet la longueur l du pendule qui fait une oscillation en 1″ sexagésimale, il suffira de supposer $t=1$, de mettre pour l sa valeur réduite en mètres, et pour π sa valeur 3,1415926.

51. *De la Figure de la Terre.* — On sait que les plus hautes montagnes ne sont que de très petites éminences, par rapport au globe de la terre : telles à-peu-près que seraient des grains de sable, disséminés sur un globe d'un mètre de rayon ; il paraît que les plus grands bassins des mers ne sont que de petites cavités, analogues aux saillies des montagnes. Ainsi, prise dans son ensemble, la surface de la terre est sensiblement régulière, et peut être considérée comme telle dans les calculs. Les plus anciens astronomes avaient reconnu sa courbure, et, comme dans leurs idées la sphère était la forme la plus parfaite, ils n'avaient pas douté que la terre ne fût une sphère très exacte ; on peut même présumer, d'après quelques documens historiques, qu'ils avaient fait de grands efforts pour en mesurer les dimensions, et qu'enfin ils y étaient parvenus d'une manière assez approchée. Cependant, la terre n'est point sphé-

rique : elle est renflée à l'équateur et aplatie vers les pôles, et nous allons essayer d'indiquer d'une manière générale la cause de l'aplatissement et les moyens par lesquels on a pu en avoir la mesure.

Si la terre était solide dans toute sa masse, ou seulement dans toute la couche extérieure qui sert d'enveloppe aux parties centrales, elle pourrait avoir une forme quelconque, et n'être ni sphérique ni sphéroïdale : seulement, il y aurait un certain rapport entre sa forme et les périodes de ses mouvemens. Au contraire, si la terre était toute fluide, elle aurait nécessairement la forme d'un sphéroïde, ou d'une sphère aplatie aux deux pôles, car la force centrifuge, qui résulte du mouvement de rotation qu'elle accomplit sans cesse sur son axe, repoussant le fluide de plus en plus, l'accumulerait vers les régions de l'équateur, où elle le soutiendrait à un niveau plus élevé. Le globe entier de la terre étant composé, en même temps, des substances solides qui forment les continens et les montagnes, et de la masse fluide qui remplit les bassins des mers, on voit qu'il y a deux questions à se proposer sur la figure de la terre, savoir : quelle est la forme générale de la surface solide des continens, et quelle est la forme de la surface des eaux. Pour celle-ci, il faut bien qu'elle soit renflée à l'équateur, car rien ne s'oppose à l'effet actuel de la force centrifuge : les eaux de l'Océan cèdent à son action, malgré les îles et les sinuosités des grandes côtes, à-peu-près comme elles feraient si elles avaient leur niveau élevé de plusieurs mille mètres au-dessus des sommets des montagnes.

Quant à la forme générale de la surface solide des continens, il résulte aussi des observations qui ont été faites, qu'elle est elle-même aplatie comme la surface des eaux, ou à-peu-près, c'est-à-dire qu'elle offre la même courbure que si le globe entier de la terre, ayant été fluide autrefois, ne se fût consolidé qu'après avoir tourné sur lui-même, comme il tourne aujourd'hui, et après avoir reçu la forme qui ré-

sulte nécessairement de ce mouvement de rotation. Une preuve frappante de l'aplatissement de la surface continentale, c'est que les montagnes des régions polaires ne sont pas très élevées au-dessus du niveau de la mer ; et cependant, si la surface de la terre était sphérique, tandis que la surface des eaux est aplatie, on voit qu'à l'équateur les montagnes devraient être moins hautes qu'au pôle de toute la valeur de l'aplatissement, c'est-à-dire de 4 à 5 lieues ; tandis qu'il paraît au contraire que les montagnes de l'équateur restent encore plus élevées que celles du pôle.

Pour prendre une idée des principes sur lesquels repose la mesure directe et géodésique de l'aplatissement de la terre, il suffit de considérer deux points éloignés et liés entre eux par une chaîne de triangle qui permette de mesurer exactement leur distance. Nous prendrons pour exemple Dunkerque et Formentera, qui se trouvent sur le méridien de Paris ; les verticales de ces deux points font entre elles un angle de 12° 22′ 14″. Ces deux lignes concourent au centre de la terre exactement, ou un peu plus près, ou un peu plus loin. Si, de leur point de rencontre, on décrit un arc de cercle passant par Dunkerque et par Formentera, c'est cet arc qui sera de 12° 22′ 14″. Or, de la chaîne des triangles on déduit que la distance de ces deux points, comptée sur cet arc de cercle, ou à très peu près, est, en mètres, de 1374438,72. Donc, si 12° 22′ 14″ forment cette distance, un seul degré forme une longueur qui est très facile à trouver : c'est cette longueur que l'on nomme un degré du méridien. Si la terre était sphérique, tous les degrés seraient égaux entre eux et vaudraient le même nombre de mètres, et réciproquement. Donc, au contraire, si l'on trouve que les degrés sont inégaux, on conclura que la terre n'est pas sphérique. On voit (*fig.* 69) que, si elle est elliptique et aplatie vers les pôles, les verticales de l'équateur, qui font entre elles un angle de 1°, vont se rencontrer plus tôt que les verticales des pôles, qui font le même

angle; ainsi l'arc de 1°, compris entre les premières, a une moindre longueur, comme appartenant à un cercle d'un plus petit rayon, que l'arc de 1°, compris entre les verticales des pôles; d'où il suit que *vice versâ*, si on trouve les degrés de l'équateur plus petits que les degrés des pôles, on pourra conclure, avec la plus grande certitude, le fait de l'aplatissement.

Or, des arcs, dont chacun avait plusieurs degrés d'étendue, ont été mesurés sur divers méridiens et à plusieurs latitudes : au Pérou, par Bouguer et la Condamine; dans l'Inde, par Lambton; au Cap de Bonne-Espérance, par Lacaille; en Pensylvanie, par Mason et Dixon; en Italie, par Lemaire et Boscowich; en France, par Delambre et Méchain; en Espagne, sur les côtes de la Méditerranée, par Arago et Biot; en Angleterre, près de Greenwich, par Roy, Delambre et Méchain; en Suède, par Melanderhielm. De l'ensemble de ces mesures, il résulte deux conséquences : premièrement, que la terre n'est pas sphérique, puisque les degrés sont inégaux à diverses latitudes; et, secondement, que la terre est en effet aplatie vers les pôles, puisque les longueurs des degrés vont en croissant à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur. En combinant ces mesures par diverses considérations géométriques, on en peut déduire les longueurs du rayon de la terre pour des latitudes diverses. On trouve alors les résultats suivans :

Rayon de l'équateur. .	6376984	mètres	ou 1434,8	lieues.
Rayon du pôle. . . .	6356324		ou 1430,1	
Différence.	20660		ou 4,7	

L'*aplatissement* est la différence entre les rayons de l'équateur et du pôle divisée par le rayon de l'équateur; il est donc, d'après ces mesures, de $\frac{1}{308,65}$. Le *rayon moyen* de la terre est celui qui correspond à la latitude de 45°; on le trouve de $6336745^m = 1432,4$ lieues. En combinant d'autres mesures, on trouve un autre rayon qui diffère un peut

du précédent, et qui est de 6366194. La différence est insensible dans la plupart des applications, puisque 500 mètres ne sont que la dixième partie de la hauteur du Mont-Blanc.

52. Les observations du pendule peuvent servir aussi à déterminer l'aplatissement de la terre; mais, pour cela, il faut avoir recours à une formule de mécanique exprimant la relation qui existe entre les intensités de la pesanteur sur deux points donnés du globe et les distances comparées de ces points au centre de la terre. C'est au moyen de cette formule que nous avons pu discuter l'ensemble des observations rapportées dans le tableau qui termine ce chapitre; mais, sans entrer ici dans les détails de cette discussion, nous nous bornerons à indiquer les principales conséquences qui en résultent, savoir : 1° que la nature du sol sur lequel on fait les observations a une influence sensible sur les oscillations du pendule; 2° qu'elle a par conséquent une influence plus ou moins marquée sur l'équilibre et sur le nivellement des eaux; 3° enfin, que par ces causes la surface de la mer a très probablement des inégalités plus ou moins grandes, des éminences et des affaissemens, qui ne l'empêchent pas d'être aplatie dans sa direction générale, à-peu-près comme l'indique la théorie, mais qui l'empêchent d'être une surface géométrique et exactement pareille à celle d'un ellipsoïde de révolution. Ainsi, quelles que soient les causes qui aient agi, à l'origine du monde, et quelles que soient celles qui aient pu se développer dans les catastrophes qui ont suivi, il arrive, comme on pouvait s'y attendre, que dans le sein de la terre toutes les matières ont été confondues, et que, plus pesantes ou plus légères, elles sont à-peu-près uniformément réparties dans toute l'étendue de chacune des couches. Il fallait qu'il en fût ainsi pour la régularité des mouvemens et pour l'ordre des saisons, car, les phénomènes se passeraient d'une tout autre manière, si l'un des hémisphères était, par exemple, léger comme du liége,

et l'autre lourd comme du plomb. Cependant cette homogénéité générale n'empêche pas qu'il ne se rencontre, dans le globe de la terre, quelque hétérogénéité locale qui ait déformé sa surface, et qui ait produit, de distance en distance, quelque dépression ou quelque renflement.

53. *Déviation du fil-à-plomb par l'attraction des montagnes.* — Toutes les portions de la matière étant attirées l'une vers l'autre, on ne voit pas d'abord pourquoi de grandes masses, telles que des montagnes, n'exercent pas d'action sensible sur les corps qui les environnent ; pourquoi, par exemple, quand on laisse tomber une pierre du haut d'un sommet élevé, cette pierre, en tombant, ne se dirige pas vers le centre de la montagne qui est très près, plutôt que vers le centre de la terre qui est très loin. On peut même s'étonner que les murs d'un édifice ne produisent pas cet effet, et que, dans un appartement, un corps qui est suspendu en haut ne tombe pas sur le plafond plutôt que de tomber sur le plancher : à-peu-près comme aux antipodes, les corps tombent en remontant vers nous. Mais, dès qu'on prend garde que la plus grosse montagne n'est qu'un grain de sable quand on la compare à la terre, on ne s'étonne plus que les montagnes ordinaires ne puissent pas attirer à elles les corps que la terre attire elle-même. L'effet qu'elles pourraient produire serait tout au plus de les dévier un peu dans leur chute. Réciproquement, si elles peuvent produire quelques déviations, on pourra être assuré que la pesanteur est, comme nous l'avons dit, une force universelle qui agit sur toute la matière, et qu'il n'y a ni tourbillon autour de la terre, ni vertu particulière vers son centre, par quoi les corps soient poussés ou sympathiquement précipités.

Bouguer est le premier qui eut l'idée de chercher, dans l'attraction des montagnes, une preuve de l'attraction universelle de la matière ; si elles agissent, elles doivent dévier le fil-à-plomb. Mais, comment reconnaître si le fil-à-plomb est dévié ? la même cause qui changerait sa direction chan-

gerait aussi celle de la surface des eaux tranquilles, à laquelle on la rapporte, et dès-lors on ne pourrait plus juger ni de l'un ni de l'autre changement. Aussi, faut-il avoir recours aux étoiles : c'est encore dans le ciel qu'il faut chercher une direction fixe pour les expériences de cette nature. C'est sur les flancs du Chimboraço, qui est une des plus grandes montagnes de la terre, que Bouguer fit son expérience. Il y rencontra des obstacles infinis, à cause de l'âpreté des lieux et des tempêtes terribles qu'il eut à essuyer dans ces hautes régions. Cependant, il accomplit son dessein et trouva dans le fil-à-plomb une déviation de 7″ ou 8″. Ces montagnes volcaniques ont sans doute d'immenses cavités qui réduisent de beaucoup l'énergie de leur action.

Depuis Bouguer, on a répété les expériences en divers lieux : Maskeline, en 1772, les a surtout répétées avec de grandes précautions, au pied des monts Shéhalliens, en Ecosse, où il a trouvé une déviation de 54″. Il en résulte que certainement les montagnes agissent sur le fil-à-plomb, et qu'elles le dévient d'une quantité sensible, qui dépend de leur volume et de la nature des substances qui les composent. Maskeline avait fait ces expériences pour en déduire le rapport de la masse de la terre à celle de la montagne, et, par suite, la densité de la terre elle-même; il trouva de cette manière que la densité de la terre, prise dans son ensemble, est 4,56, ou à-peu-près quatre fois et demie la densité de l'eau. C'est, je crois, la première notion que l'on ait eue sur la nature des substances qui composent les couches centrales du globe.

En 1824, M. Carlini a fait, au sommet du Mont-Cenis, des observations d'une autre espèce, qui l'ont conduit à-peu-près au même résultat.

54. Enfin, nous devons à Cavendish une autre détermination de la densité moyenne de la terre. Son appareil paraît être le plus exact que l'on puisse employer à cette recherche. La première idée de sa construction est due à

Michell, de la Société royale de Londres : Michell n'ayant pas eu le temps d'achever ses expériences, et voyant sa fin approcher, légua son appareil à l'honorable *Francis-John-Hyde Wollaston*, professeur à Cambridge ; et celui-ci, à son tour, en fit don à Cavendish, qui était déjà compté parmi les premiers physiciens de l'Angleterre. Voici l'idée principale sur laquelle repose ce procédé : si l'on avait une grande boule de métal de 10 pieds de rayon, il est clair qu'elle ne pourrait pas dévier le fil-à-plomb, puisque les montagnes ne le dévient que de quelques secondes : mais, si, au lieu d'un fil vertical sur lequel agit la pesanteur, on lui présentait au niveau de son centre un levier horizontal, bien équilibré et parfaitement mobile, il est clair qu'elle devrait l'attirer à elle et le faire tourner, puisque la pesanteur serait alors sans effet pour contrarier son action. Le levier horizontal serait donc une espèce de pendule qui oscillerait par l'attraction de la boule, comme le pendule ordinaire oscille par l'action de la terre. Si même, au lieu d'une boule, on en mettait deux, agissant chacune sur l'une des extrémités du levier, on voit que l'effet serait doublé ; ainsi, par ce moyen, en prenant des boules assez grosses et des leviers assez mobiles, on peut sans doute rendre sensible l'action de la matière sur la matière, et produire en petit, autour de ces sphères de métal, ce qui se produit en grand autour du globe de la terre.

L'appareil de Cavendish est représenté dans les *figures* 67 et 68. La *figure* 68 en représente la projection horizontale. *u* et *v* sont les deux sphères de métal, elles étaient en plomb et pesaient chacune $157^k,925$; *a b c d* représente la section d'une caisse dans laquelle on avait enfermé le levier mobile pour le garantir complètement de toutes les agitations de l'air ; *s* et *s'* sont deux petites balles suspendues aux deux extrémités du levier mobile et parfaitement en équilibre.

La *figure* 67 est une coupe verticale, les mêmes lettres

désignent les mêmes choses : on voit ici comment les deux petites balles sont suspendues par un fil d'argent qui traverse les extrémités du levier ; ce fil vient en *n* s'attacher au fil vertical *ff'* dont la tenacité est assez grande pour porter le fléau et les balles *s* et *s'*, et dont la torsion est la seule force qui s'oppose aux oscillations : les deux masses *u* et *v* sont elles-mêmes suspendues par des tiges de fer, et peuvent tourner autour de la caisse ; elles passent successivement des positions *u* et *v* figurées en lignes pleines aux positions *u'* et *v'* figurées en lignes ponctuées ; elles y sont conduites par une manœuvre qui s'exécute du dehors : enfin, tout l'appareil est enfermé dans une chambre sans portes et sans fenêtres ; il n'est éclairé que par une petite ouverture, au moyen d'une lampe *g* placée en dehors des murs pour ne pas échauffer l'air intérieur : et c'est avec la lunette *ll'* que l'on observe les mouvemens qui se produisent.

Tout étant en repos et les masses *u* et *v* étant dans la situation où elles n'agissent pas, c'est-à-dire dans la situation perpendiculaire au levier mobile, on les fait tourner pour les mettre dans la situation de la *figure* 68 : alors le levier se met à tourner, les petites balles *s* et *s'* sont attirées chacune vers la boule correspondante, et les oscillations commencent. C'est une preuve bien irrévocable que la matière attire la matière, et que les petites balles *s* et *s'* tendent à tomber sur les grandes sphères de plomb par la même puissance qui les fait tomber sur la terre, et que, s'il y a une différence, elle provient seulement de la différence des masses. Ce fait fondamental une fois prouvé, il ne reste plus qu'à observer la durée des oscillations des petites balles, la longueur du levier à l'extrémité duquel elles oscillent, et leur distance au centre des grandes sphères *u* et *v*, qui peuvent être considérées comme les centres d'attraction. Ensuite, après avoir corrigé les résultats des effets de la torsion du fil de suspension, l'on arrive à con-

TABLEAU DES OBSERVATIONS DU PENDULE.

STATIONS. (1)	LATITUDE Nord—N. Sud.—S. (2)	LONGUEUR du PENDULE à la station. (3)	HAUTEUR de LA STATION au-dessus du niveau de la mer, en mètres. (4)	LONGUEUR du PENDULE sexagésimal réduite au niveau de la mer. (5)	NOMS des OBSERVATEURS. (6)	AVANCE ou RETARD du pendule de Paris, transporté à chaque station réduite. (7)	LONGUEUR du PENDULE SEXAGÉSIMAL, calculé par l'ensemble de toutes les observations. (8)	AVANCE ou RETARD EN UN JOUR du pendule calculé sur le pendule observé. (9)	HAUTEUR à laquelle il faudroit placer le pendule, pour qu'il fût d'accord avec le pendule calculé. (10)
		lig.	m.	m.m.					
Paris.	48° 50′ 14″ N.	440,5595	70	993,8495	Borda.		993,90017	— 2″50	+ 169
		mm.							
Unst..	60 45 25 N.	742,721054	9	994,9458	Biot..	+ 46″9	994,88706	+ 2,56	— 188
Leith..	55 58 57 N.	742,408553	21	994,5514	Biot	+ 28,8	994,50960	+ 0,92	— 68
Dunkerque	51 02 10 N.	742,07610	4	994,0802	Biot, Mathieu..	+ 9,3	994,09189	— 0,50	+ 37
Paris..	48 50 14 N.	741,90112	70	993,8666	Biot, Bouvard, Mathieu..	00,0	993,90017	— 1,43	+ 105
Clermont..	45 46 48 N.	741,61059	406	993,5822	Biot, Mathieu	— 12,4	993,65055	— 2,09	+ 154
Bordeaux..	44 50 26 N.	741,60464	17	993,4550	Biot, Mathieu	— 18,0	993,54740	— 4,11	+ 302
Figeac.	44 36 45 N.	741,56055	225	993,4578	Biot, Mathieu..	— 17,8	993,52721	— 3,01	+ 222
Formentera.	38 39 56 N.	741,20540	203	992,9760	Biot, Arago, Chaix.. . .	— 38,7	993,00533	— 1,27	+ 94
		p.							
Unst.	60 45 28 N.	39,17145	9	994,9595	Kater.	+ 46,6	994,88712	+ 2,28	— 168
Portscy..	57 40 59 N.	39,16140	29	994,6906	Kater.	+ 35,8	994,64791	+ 1,86	— 137
Leith..	55 58 41 N.	39,15540	21	994,5554	Kater.	+ 29,1	994,50969	+ 1,13	— 83
Clifton.	53 27 43 N.	39,14517	103	994,5018	Kater.	+ 21,1	994,29972	+ 0,09	— 7
Arbury-Hill.	52 12 55 N.	39,14057	225	994,2228	Kater.	+ 15,5	994,19548	+ 1,28	— 94
London..	51 31 08 N.	39,13908	28	994,1252	Kater.	+ 11,1	994,13560	— 0,43	+ 32
Shanklin-farm.	50 37 24 N.	39,13551	74	994,0468	Kater.	+ 7,8	994,05610	— 0,59	+ 29
Paris..	48 50 14 N.	1,00000000	70	993,8666	Freycinet	00,0	993,90017	— 1,43	+ 105
Ile Movi	20 52 07 N.	0,99792769	1,5	991,7850	Freycinet	— 90,5	991,66918	+ 5,06	— 373
Ile Guam.	13 27 51 N.	0,99759268	2,0	991,4520	Freycinet	— 105,0	991,30055	+ 6,63	— 488
Ile Rawak..	0 01 51 S.	0,99709528	1,5	990,9577	Freycinet	— 126,5	991,02557	— 2,92	+ 215
Ile-de-France	20 09 56 S.	0,99705729	15,5	991,7987	Freycinet	— 89,9	991,62852	+ 7,45	— 549
Rio-de-Janeiro..	22 55 15 S.	0,99785415	5	991,6950	Freycinet	— 94,6	991,79485	— 4,39	+ 324
Port-Jackson..	33 51 51 S.	0,99876587	33,05	992,0260	Freycinet	— 54,0	992,60001	— 1,15	— 85
Cap de Bonne-Espérance.	33 55 15 S.	0,99871111	15	992,5677	Freycinet	— 56,5	992,60504	— 1,59	+ 117
Iles Malouines.	51 55 48 S.	1,00022150	6	994,0657	Freycinet	+ 8,6	994,13959	— 3,17	+ 234
Saint-Thomas.	0 21 41 N.	39,02069	6	991,1094	Sabine	— 119,9	991,02583	+ 3,64	— 268
Maranham..	2 31 43 S.	39,01197	23	990,8952	Sabine	— 129,4	991,03544	— 6,18	+ 455
Ascension.	7 55 48 S.	39,02106	5	991,1948	Sabine	— 116,2	991,12211	+ 3,16	— 233
Sierra-Leone..	8 29 28 N.	39,01954	55	991,0953	Sabine	— 120,7	991,13615	— 1,73	+ 128
Trinidad.	10 38 56 N.	39,01879	6	991,0609	Sabine	— 122,1	991,19876	— 5,98	+ 440
Bahia	12 59 24 S.	39,02378	65	991,2064	Sabine	— 115,7	991,28180	— 3,28	+ 242
Jamaica..	17 56 07 N.	39,03508	3	991,4739	Sabine	— 104,1	991,50653	— 1,42	+ 104
New-York..	40 42 43 N.	39,10153	20	993,1682	Sabine	— 30,4	993,18354	— 0,65	+ 46
London..	51 31 08 N.	39,13908	28	994,1252	Sabine	+ 11,1	994,13560	— 0,43	+ 32
Drontheim	63 25 51 N.	39,17428	37	995,0200	Sabine	+ 50,1	995,08284	— 2,72	+ 200
Hammerfest	70 40 05 N.	39,19512	9	995,5405	Sabine	+ 72,7	995,54165	— 0,03	+ 2
Greenland..	74 32 19 N.	39,20528	9	995,7478	Sabine	+ 81,7	995,75099	+ 0,50	— 37
Spitzberg.	79 49 58 N.	39,21464	6	996,0356	Sabine	+ 94,2	995,95941	+ 4,19	— 309
Paris..	48 50 14 N.	1,00000000	70	993,8675	Duperrey	00,0	993,90017	— 1,43	+ 105
Toulon.	43 07 09 N.	0,99955725	3	993,5858	Duperrey	— 20,9	993,39514	— 0,40	+ 30
Ascension.	07 55 09 S.	0,99751962	5	991,1824	Duperrey	— 116,8	991,12185	+ 2,63	— 194
Ile-de-France	20 09 19 S.	0,99790905	4,98	991,7682	Duperrey	— 91,5	991,62775	+ 6,14	— 450
Port-Jackson..	33 51 39 S.	0,99875558	6,08	992,5879	Duperrey	— 55,6	992,60012	— 0,53	+ 39
Iles-Malouines.	51 31 44 S.	1,00028461	6	994,1295	Duperrey	+ 41,4	994,13446	— 0,22	+ 16

OBSERVATIONS.

(3) Cette colonne contient les longueurs du pendule, telles qu'elles ont été données par les Observateurs. Pour Borda, l'unité est la ligne; pour M. Biot, elle est le millimètre, mais son pendule est le pendule décimal; pour MM. Freycinet et Duperrey, l'unité est la longueur du pendule de Paris; pour MM. Kater et Sabine, l'unité est le pouce anglais.

(5) Cette colonne contient toutes les longueurs du pendule sexagésimal, exprimées en millimètre et réduites au niveau de la mer par la formule ordinaire $\frac{2\,hl}{r}$. Nous devions adopter le mode uniforme de réduction, pour discuter l'ensemble des observations.

(7) Il est curieux de connaître l'avance ou le retard qu'éprouveraît en un jour moyen le pendule à secondes, de Paris, en le supposant transporté successivement sur la verticale de toutes les autres stations et au niveau de la mer; c'est ce qui est exprimé dans la colonne : le signe + indique que le pendule de Paris serait en avance, et le signe — qu'il serait en retard.

(8) Cette colonne contient les longueurs du pendule à secondes, calculées par l'ensemble de toutes les observations, en les combinant par la méthode des moindres carrés, qui donne la formule :

$$l = 0{,}99102557 + 0{,}00507188\ \sin^2\lambda.$$

(9) Cette colonne contient la différence qui a lieu, en chaque station, entre les nombres d'oscillations que le pendule calculé et le pendule observé peuvent exécuter en un jour. On voit que ces différences sont en général assez petites; d'où il résulte que la courbure, calculée par l'ensemble des observations, représente chacune de ces observations d'une manière assez approchée. Cette courbure donne un aplatissement de $\frac{1}{333}$. La plus grande différence positive est 7″45; elle correspond à l'Ile-de-France : c'est un fait très remarquable, que les observations du capitaine Duperrey s'accordent, avec celles du capitaine Freycinet, à donner une différence aussi forte. S'il est permis de conclure quelque chose sur la forme de la terre au moyen des observations du pendule, il faudrait conclure qu'à l'Ile-de-France il y a dans le sol une densité locale très considérable, ou une grande dépression de niveau. La plus grande différence négative est de — 6″ 18; elle correspond à Maranham, qui offrirait, d'après les mêmes conséquences, un sol très léger ou un niveau très relevé, ou peut-être les deux circonstances à la fois. Le capitaine Sabine a, en effet, observé que Maranham est d'un terrain d'alluvion très peu dense.

(10) Cette colonne contient la hauteur en mètres à laquelle s'élève en chaque lieu le niveau de la mer au-dessus du niveau réel, ou la profondeur à laquelle il s'enfonce. Ainsi, à l'Ile-de-France, la surface de la terre serait déprimée de 500 mètres, et à Maranham elle serait trop élevée de 455 mètres. Il résulte de cette discussion : 1° que les observations du pendule réunies dans ce tableau offrent entre elles un accord remarquable, ce qui prouve que les Observateurs ont atteint à un degré d'exactitude satisfaisant; 2° que l'aplatissement que l'on peut en déduire, par la formule de Clairaut, est sensiblement plus grand que l'aplatissement $\frac{1}{333}$, donné par la théorie de la lune; 3° enfin, que la terre semble présenter en plusieurs de ses points de légères variations dans l'intensité de la pesanteur, qui tiennent sans doute à une action locale des couches de la superficie, ou à une irrégularité de forme, ou peut-être à ces deux circonstances réunies.

naître l'effet d'une sphère de plomb du poids de 157k,925, pour faire osciller un pendule simple d'une longueur connue, et placé à une distance connue de son centre. La question étant amenée à ce point, il n'y a plus que des proportions à faire pour avoir la masse de la terre, comparée à la masse du globe de plomb, car, ces masses sont entre elles comme les longueurs des pendules simples qui battent la seconde, étant placés à une même distance de leur centre. Dans cette proportion tout est connu, excepté la masse de la terre que l'on peut par conséquent en déduire ; on connaît d'ailleurs son volume par les mesures de l'arc du méridien, et, en divisant la masse par le volume, on obtient enfin sa densité moyenne. Pour dernier résultat de ces belles expériences, Cavendish trouve que la densité moyenne de la terre est de 5,48, c'est-à-dire à très peu près cinq fois et demie la densité de l'eau.

Connaissant la densité de la terre et son volume, il est facile de trouver combien elle pèse de kilogrammes, ou plutôt combien de kilogrammes on trouverait si l'on pouvait successivement prendre par petits fragmens, d'un mètre cube par exemple, toutes les substances qui la composent pour les peser dans une balance, à Londres ou à Paris, et si l'on pouvait les remettre en place après les avoir pesées ; car, d'après ce que nous venons de voir sur l'attraction générale de la matière, nous pouvons être sûrs, quand nous faisons une pesée, que toutes les molécules du globe contribuent à faire pencher la balance.

Par les observations et par les calculs astronomiques, on évalue les masses des planètes et celle du soleil au moyen de la masse de la terre ; d'où il suit qu'avec le poids de la terre nous pouvons trouver le poids de toutes les planètes. Ainsi, le petit appareil de Cavendish est une balance dans laquelle on peut peser le monde.

CHAPITRE V.

De l'Hydrostatique.

55. L'OBJET de l'hydrostatique est de déterminer les conditions d'équilibre des liquides, et les pressions qu'ils exercent sur les parois des vases qui les contiennent.

Les propriétés des liquides dépendent de deux forces : de la pesanteur qui agit sur eux comme sur tous les corps, et de l'attraction moléculaire qui agit sur eux d'une manière déterminée pour les constituer à l'état liquide. Nous pouvons distinguer par la pensée ce qui appartient à chacune de ces forces ; car nous pouvons imaginer une masse d'eau qui cesse un moment d'être pesante, sans pour cela cesser d'être liquide : une telle masse ne pourrait plus ni tomber quand on l'abandonne, ni couler quand on la verse ; et il est évident qu'elle n'aurait plus besoin, pour être en repos, ni d'être soutenue sur le sol, ni d'être contenue dans un vase. Dans cet état, elle pourrait encore recevoir et transmettre des pressions, conformément au principe général que nous allons examiner.

56. *Principe d'égalité de pression.* Les liquides sont soumis au principe d'égalité de pression, c'est-à-dire qu'ils ont la propriété de transmettre, dans tous les sens et également, les pressions qu'on exerce à leur surface.

Ce principe est un axiome de physique, mais, s'il n'est pas nécessaire de le démontrer, il est au moins nécessaire de le faire comprendre : *abcd* (*fig.* 70) est un vase qui contient un liquide supposé sans pesanteur ; *p* est un piston solide qui en couvre exactement toute la surface. Si le piston est aussi sans pesanteur, et s'il n'est chargé d'aucun poids, il est clair que le liquide n'éprouve aucune pression, et que

l'on pourrait percer le vase sans qu'il s'écoulât: mais, dès-qu'on pose sur le piston un poids de 100 kilogrammes, par exemple, à l'instant il fait effort pour descendre, et descendrait en effet si le liquide ne s'y opposait pas. Que le liquide soit compressible ou qu'il ne le soit pas du tout, le résultat est le même : il faut de toute nécessité qu'il s'anéantisse ou qu'il porte les 100 kilogrammes. La couche supérieure x, qui touche au piston et qui le soutient, en supporte donc tout le poids, et, pressée comme elle est, elle tomberait nécessairement si elle n'était pas soutenue par la couche y, qui est au-dessous d'elle ; elle presse sur cette couche autant qu'elle est elle-même pressée par le piston. De même, la couche y presse sur la suivante z, et ainsi de suite, la pression se communiquant de proche en proche jusqu'au fond du vase, qui est lui-même pressé comme si le piston reposait immédiatement sur lui. Puisque c'est toute la surface du fond qui porte cette pression de 100 kilogrammes, il est visible que la moitié de la surface ne porte pour sa part que 50 kilogrammes, et que la centième partie de sa surface ne porte que la centième partie de la pression totale, c'est-à-dire un seul kilogramme. Ainsi :

1° La pression se transmet de haut en bas sur les surfaces horizontales, sans rien perdre de sa force ;

2° Elle est égale en chaque point ;

3° Elle est proportionnelle à l'étendue de la surface que l'on considère.

Sur les faces latérales le même phénomène a lieu : car, si en un point quelconque on faisait une ouverture, le liquide jaillirait, et, si l'on découpait une partie de la surface, elle serait poussée dehors ; enfin, si la portion que l'on découpe était égale à toute la largeur du piston, il ne faudrait pas moins de 100 kilogrammes pour la tenir en place; et, si elle n'avait qu'une étendue cent fois moindre, il ne faudrait qu'un effort d'un kilogramme. Si le piston lui-même était percé d'un trou, le liquide jaillirait de bas en haut, ce qui

prouve que sa paroi est elle-même pressée comme le sont toutes les autres. Ainsi, les liquides transmettent, dans tous les sens et également, les pressions qu'on exerce à leur surface.

Après avoir compris ce principe pour des liquides sans pesanteur, il est facile de voir qu'il s'applique sans réserve aux liquides pesans, mais qu'alors il y a des pressions qui s'exercent sur chaque molécule et qui résultent de la pesanteur qui leur est propre.

57. *De l'équilibre des liquides pesans.* Il y a deux conditions pour l'équilibre des liquides : il faut, premièrement, que les molécules supérieures et libres forment une surface perpendiculaire à la force qui les sollicite ; et, secondement, qu'une molécule quelconque de la masse éprouve dans tous les sens des pressions égales et contraires.

Première condition d'équilibre. Supposons que la surface ne soit pas perpendiculaire à la force qui sollicite les molécules liquides, qu'elle soit par exemple dans la direction *abcde*, tandis que la force est dirigée suivant les verticales *vv* (*fig.* 71) : alors, une petite couche horizontale, telle que *bd*, serait pressée de tout le poids des molécules qui sont au-dessus d'elle ; cette pression, comme nous venons de le voir, se transmettrait latéralement, et la molécule *b*, poussée par cette pression latérale, serait poussée dehors, puisqu'il n'y a rien qui la retienne ; elle sortirait donc ; une autre viendrait, qui prendrait sa place, et qui serait poussée à son tour ; et ainsi de suite, jusqu'à ce que la courbure *bcd* se fût affaissée et fût devenue tout-à-fait horizontale. Il en arriverait de même de toute portion de liquide qui serait *au-dessus* d'un autre point quelconque de la surface, et l'équilibre ne peut avoir lieu que quand les molécules libres ne peuvent plus tomber, c'est-à-dire quand elles sont toutes rangées sur une même surface perpendiculaire à la force.

En appliquant ce principe à la surface de la mer, supposée parfaitement calme, il nous sera facile de prendre une

idée de sa courbure et des causes qui la déterminent. Si toutes les directions de la pesanteur concouraient exactement au centre de la terre, et si cette force était la seule qui sollicitât les molécules liquides, il faudrait que dans tous les bassins de toutes les mers la surface libre des eaux prît la forme sphérique ; car il n'y a que cette surface qui soit perpendiculaire à tous les rayons qui concourent en un point. Il faudrait de plus que toutes les plages fussent à la même distance du centre de la terre, car sans cela elles ne seraient pas au même niveau, et l'eau des plus élevées tomberait sur les plus basses.

C'est cette condition nécessaire de l'équilibre des masses fluides qui explique ce que nous avons annoncé dans le chapitre premier sur la direction de la pesanteur ; il faut bien que cette force soit perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles, puisque c'est elle-même qui oblige les eaux à se ranger dans cette direction.

Quand les molécules liquides sont sollicitées par quelque autre force que par la pesanteur terrestre, on conçoit que pour l'équilibre elles ne doivent plus former une surface perpendiculaire à la pesanteur seulement, mais une surface perpendiculaire à la résultante de la pesanteur et de toutes les autres forces qui agissent avec elle. Ainsi, la force centrifuge, qui résulte du mouvement de rotation de la terre, se combinant sans cesse avec la pesanteur pour solliciter tous les corps, il faut que la surface des eaux s'arrange pour être perpendiculaire à la résultante de ces deux forces, et voilà pourquoi la surface de la mer est aplatie vers ses pôles. Au pied des grandes montagnes, dont la masse est capable de dévier le fil-à-plomb, la surface des eaux est aussi déviée de sa forme régulière ; elle se soulève et s'incline sur la véritable verticale, pour se mettre perpendiculaire à la résultante des actions de la terre et de la montagne. De même encore, quand la lune passe au-dessus ou au-dessous de l'horizon de la mer, la force at-

tractive qu'elle exerce sur les eaux se combine avec la pesanteur pour produire une résultante qui n'est plus verticale; et c'est ainsi que la surface mobile de l'Océan, cherchant un équilibre qu'elle ne saurait trouver, à cause du mouvement de rotation de la lune, se soulève et se déprime tour-à-tour, et accomplit enfin les oscillations périodiques du flux et du reflux.

Il se présente dans la nature beaucoup d'autres phénomènes qui semblent n'avoir aucun rapport avec les marées, et qui dépendent cependant d'un principe analogue : on sait, par exemple, que dans un verre ordinaire la surface de l'eau n'est pas plane dans toute son étendue, mais qu'elle se relève près des bords, comme le représente la *figure* 72 : au contraire, la surface du mercure se déprime au contact des parois et semble craindre de les toucher (*fig.* 73). C'est que la pesanteur n'est pas alors la seule force qui agisse sur les liquides; avec elle il y a deux autres forces : la force attractive que leurs molécules propres exercent l'une sur l'autre, et la force attractive qu'elles exercent sur la matière du vase. C'est à la résultante de ces trois forces que la surface liquide doit être perpendiculaire, et c'est surtout du rapport d'énergie qui existe entre les deux dernières que dépend l'inflexion qu'elle éprouve au-dessus ou au-dessous de la ligne de niveau. Nous verrons sortir de ce principe toute cette classe de phénomènes qui sont connus sous le nom de *phénomènes capillaires*, et dont nous devons traiter dans un des livres suivans.

Deuxième condition d'équilibre. — La deuxième condition d'équilibre est évidente d'elle-même, car les molécules, qui sont dans l'intérieur de la masse liquide, reçoivent les pressions de toutes les molécules qui sont placées au-dessus d'elles, et, en vertu du principe d'égalité de pression, elles tendent à transmettre ces pressions dans tous les sens : or, si, dans deux directions opposées, les pressions que supporte une molécule n'étaient pas égales et contraires, cette

molécule serait entraînée par la plus forte pression, et par conséquent la masse liquide ne serait pas en équilibre.

58. *Pressions.* — Lorsque les masses liquides sont en équilibre, elles exercent sur elles-mêmes, et sur tous les corps solides qu'elles touchent, des pressions plus ou moins considérables, dont nous allons déterminer la valeur, en examinant successivement les pressions de haut en bas et de bas en haut qui sont exercées sur les surfaces horizontales, puis les pressions exercées sur les surfaces obliques.

1° La pression de haut en bas qu'un liquide exerce sur le fond du vase qui le contient est tout-à-fait indépendante de la forme du vase, et elle est toujours égale au poids d'une colonne de même liquide ayant pour base le fond du vase et pour hauteur la hauteur du niveau.

La première partie de cette proposition se démontre aisément au moyen de l'appareil de M. de Haldat, *figure* 78. Cet appareil se compose d'un tube recourbé *a b c*, fixé dans une caisse *y*, et ajusté pour recevoir en *a* des vases de différentes formes, tels que *d*, *e*, *f* (*fig.* 79, 80 *et* 81). On commence par mettre du mercure dans le tube *a b c*, et, au moyen d'un curseur, on note sur la branche *c* la hauteur *n*, à laquelle il s'arrête; alors on visse, sur l'extrémité *a*, le vase cylindrique *d*; on y verse de l'eau jusqu'à une certaine hauteur *h*, et l'on observe la hauteur *p*, à laquelle le mercure s'élève dans la branche *c*. L'élévation *n p* de la colonne de mercure résulte évidemment de la pression que l'eau contenue dans le vase *d* exerce sur la surface de mercure qui forme le véritable fond de ce vase. Cette observation faite, on vide le vase *d* au moyen du robinet *r*, et on l'ôte pour lui substituer successivement le vase élargi *e* ou le vase rétréci *f*. Aussitôt que l'on a versé dans ceux-ci une colonne d'eau aussi haute que dans le vase *d*, on observe que le mercure de la branche *c* s'élève exactement à la même hauteur *p*. Donc, la pression que ces trois vases de différentes formes reçoivent sur leur fond est exactement la même,

quand la hauteur du liquide est la même, et, par conséquent, comme nous l'avons annoncé, la pression est indépendante de la forme du vase; pour le même fond, le même liquide et la même hauteur, elle est toujours la même, soit que le vase soit cylindrique (*fig.* 74), soit qu'il contienne beaucoup de liquide (*fig.* 75), soit qu'il en contienne très peu (*fig.* 76), soit que le vase soit droit, soit qu'il soit oblique (*fig.* 77).

Pour démontrer maintenant la seconde partie de la proposition, il suffit de remarquer que dans le vase cylindrique (*fig.* 74) le fond *a b* supporte exactement tout le poids du liquide; car les pressions qui s'exercent sur les parois latérales étant horizontales, elles ne peuvent contribuer en rien à soutenir le poids du liquide, ni à l'augmenter ni à le diminuer. Or, les vases obliques, élargis ou rétrécis, recevant sur leur fond la même pression que le vase cylindrique, il en résulte que dans ceux-ci la pression n'est plus égale au poids du liquide qu'ils contiennent, mais qu'elle est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base le fond du vase, et pour hauteur la hauteur du niveau, comme si le vase était cylindrique.

Toutes les portions du fond étant également pressées, il est évident que, si, au lieu de considérer le fond dans sa totalité, on n'en considérait qu'une partie, comme la moitié, le tiers ou le quart, la pression supportée par cette partie serait la moitié, le tiers ou le quart de la pression totale. Si l'on représente en général par s la portion du fond que l'on considère, par h la hauteur du niveau, et par d la densité du liquide : la pression sur la surface s sera exprimée par $s\,d\,h$, car $s\,h$ est le volume de la colonne liquide; et, pour avoir le poids, il faut multiplier le volume par la densité.

Ainsi, avec un litre d'eau qui pèse un kilogramme, on peut exercer sur le fond d'un vase une pression très petite, et l'on peut exercer aussi une pression infiniment grande. Pour que la pression soit d'un kilogramme, par exemple, il suffit de prendre un vase cylindrique de base quelconque;

la pression totale sera toujours égale au poids du liquide, et par conséquent toujours un kilogramme : seulement, la pression sur chaque centimètre carré du fond sera plus petite ou plus grande, suivant que le vase sera plus large ou plus étroit.

Pour que la pression soit de $\frac{1}{10}$ de kilogrammes, il suffit de prendre un vase dont la base soit par exemple un décimètre carré, et qui soit tellement évasé que le litre d'eau n'y prenne que $\frac{1}{10}$ de décimètre ou un centimètre de hauteur.

Pour que la pression soit de 10 kilogrammes, il suffit de prendre un vase dont la base soit par exemple d'un décimètre carré, mais tellement rétréci que le litre d'eau y prenne une hauteur de 10 décimètres ou d'un mètre.

Avec le même poids de 1 kilogramme, il serait tout aussi facile d'exercer une pression de $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1000}$, etc., de kilogramme, ou une pression de 100, 1000, etc., kilogrammes.

Ce n'est pas seulement sur les fonds des vases que s'exercent les pressions verticales des liquides, elles s'exercent encore sur tous les points de l'intérieur de la masse et se communiquent de toutes parts en vertu du principe d'égalité de pression : concevons, en effet, dans l'intérieur de la masse liquide, une couche *mp* (*fig.* 82) qui soit parallèle à la surface du niveau *nv;* toutes les molécules qui composent cette couche sont évidemment pressées par tout ce qui est au-dessus d'elles; elles sont comme si elles supportaient un piston d'un poids égal au poids du cylindre liquide *nvmp* : seulement, cette pression qu'elle éprouve de haut en bas se transmet de bas en haut par le principe d'égalité de pression, et chacune de ses molécules n'est en équilibre que par la simultanéité de ces pressions contraires. Ainsi, en ne considérant qu'une portion *ab* de cette couche, il faut bien comprendre que la surface *ab* est à la fois pressée de haut en bas par la colonne liquide *dabc*, et de bas en haut par

une force exactement égale; tellement que, si un cylindre solide était plongé dans l'eau, et que sa base vînt s'appuyer sur la surface *ab*, cette pression de bas en haut agirait sur le cylindre et tendrait à le pousser dehors.

Cette conséquence se vérifie par l'expérience suivante : *v* (*fig.* 83 *et* 84) est un tube de verre un peu épais, qui est bien *dressé* à son extrémité inférieure; *t* est un disque de verre dépoli, qui est pareillement plan, et qu'on appelle *obturateur;* il est attaché par un fil qui passe dans le tube, en sorte qu'en tirant le fil l'obturateur vient fermer le tube; on le ferme ainsi et on le plonge dans l'eau. Alors, il n'est plus nécessaire de tirer le fil pour empêcher que l'obturateur ne tombe, parce qu'il est repoussé en haut par toute la pression de bas en haut qui s'exerce sur sa surface; et cette pression est égale à celle qu'il supporterait de haut en bas s'il était seul plongé dans l'eau à la même profondeur. Pour en donner la preuve, on verse de l'eau dans le tube : dès que le niveau intérieur approche du niveau extérieur *n*, l'obturateur est poussé de haut en bas, autant qu'il était repoussé de bas en haut, et l'on voit en effet qu'il tombe par son propre poids.

Ainsi, au fond d'un bateau, si l'on faisait une ouverture, l'eau jaillirait à l'instant, et, pour l'empêcher d'entrer, il faudrait exercer une pression qui fût égale au poids d'une colonne d'eau, ayant pour base l'ouverture, et pour hauteur la profondeur du bateau au-dessous du niveau. C'est pour cela que, dans les grands vaisseaux, la quille doit avoir une grande force pour résister aux pressions de bas en haut qui s'exercent sur le fond du bâtiment. Si ce fond était horizontal, et qu'il eût par exemple 100 mètres carrés de superficie, la pression serait égale à cent mille kilogrammes quand le *tirant* serait d'un mètre, et à trois cent mille kilogrammes quand il serait de trois mètres.

Nous pouvons juger par-là des énormes pressions qui s'exercent dans les lacs et dans les mers, et de celles qui sont

supportées par tous les élémens chimiques qui s'y trouvent et par tous les corps vivans qui en peuplent les profondeurs. Nous reviendrons sur ce sujet dans le chapitre suivant.

2° La pression que supporte une paroi latérale est égale au poids d'une colonne liquide qui aurait pour hauteur verticale la profondeur du centre de gravité de la paroi au-dessous du niveau, et pour base horizontale une surface égale à la paroi elle-même.

Les pressions latérales se déduisent des pressions horizontales correspondantes au moyen du principe d'égalité de pression : le point m (*fig.* 82) faisant partie de la couche horizontale mp, cette couche lui transmet la pression qu'elle supporte elle-même; elle la transmet dans tous les sens, et par conséquent le point m la reçoit dans la direction perpendiculaire à la paroi dont il fait partie. Ainsi, chaque étendue d'une paroi latérale éprouve la même pression qu'une égale étendue de la couche horizontale qui lui correspond, c'est-à-dire que shd représente aussi les pressions latérales : seulement, la surface s doit toujours être assez étroite en hauteur pour que la pression soit sensiblement la même dans toute son étendue. Dans une cuve d'eau de 10 mètres de hauteur, la pression sur un centimètre carré de la paroi latérale est donc de 100 grammes à 1 mètre de profondeur; elle est de 200 grammes à 2 mètres, et d'un kilogramme à 10 mètres, c'est-à-dire tout-à-fait au fond.

Pour avoir la somme des pressions latérales supportées par une paroi plane, qu'elle soit triangulaire, polygonale, ou de forme quelconque, on voit qu'il suffit de trouver la résultante d'un système de forces qui sont toutes parallèles, mais qui croissent proportionnellement à la profondeur, et aussi proportionnellement à l'étendue horizontale de la portion de paroi que l'on considère. C'est par cette composition de forces qu'on arrive, pour les pressions latérales, au théorème général que nous venons d'énoncer.

59. *Centre de pression.* — Le point d'application de la

résultante de toutes les pressions élémentaires est ce qu'on appelle le *centre de pression ;* il est toujours placé plus bas que le centre de gravité, puisqu'il coïnciderait avec lui si les forces n'allaient pas en croissant à mesure que l'on descend. Dans une paroi qui a la forme d'un parallélogramme, le centre de pression est sur la ligne qui divise en deux parties égales les côtés horizontaux, et à $\frac{1}{3}$ de sa hauteur en partant du fond. Dans une paroi triangulaire dont la base est au fond, il est au quart d'une ligne analogue, et au contraire, quand la base est à fleur d'eau, il est à moitié.

60. *Vases communiquans.* — Lorsque plusieurs vases communiquent entre eux, quels que soient leur nombre et leur forme, les liquides qu'ils contiennent sont, pour l'équilibre, soumis aux deux conditions que nous avons établies précédemment. Ainsi, quand c'est le même liquide qui remplit tous les vases, il faut, pour première condition, que toutes les surfaces soient *de niveau*, et, pour la seconde, qu'elles soient *de même niveau;* car, sans cela, les couches de niveau de l'intérieur de la masse ne seraient pas également pressées dans toute leur étendue. En effet, dans le vase (*fig.* 85 *et* 86), si le niveau de la grande branche était par exemple en *ab*, au lieu d'être en *n*, sur la même ligne horizontale *nv*, la couche de niveau *mp* ne serait pas également pressée en *m* et en *p*, et l'équilibre n'aurait pas lieu, puisqu'une couche de niveau quelconque doit toujours être également pressée dans toute son étendue.

Quand les liquides sont différens, il faut que les surfaces aient des niveaux différens.

Dans le vase représenté *figure* 87, il y a de l'eau dans la grande branche et du mercure dans la petite : les liquides se touchent en *g*, et on mène l'horizontale *gh*; si les sections *g* et *h* n'avaient rien au-dessus d'elles, l'équilibre aurait lieu ; ainsi, pour l'équilibre, il faut que sur chaque point de leur étendue elles soient également pressées : l'une par l'eau, et l'autre par le mercure. Or, une portion *s* de la section *hg*

supporte une pression $s\,h\,d$, en désignant par h la hauteur de l'eau au-dessus de d, et par d sa densité; de même, une égale portion de la section h supporte $s\,d'\,h'$, h' étant la hauteur du mercure au-dessus de h, et d' sa densité. Il faut donc que l'on ait $s \times hd = s \times h'\,d'$, ou $\frac{h}{h'} = \frac{d'}{d}$; c'est-à-dire que les hauteurs au-dessus du point de jonction des liquides sont entre elles en raison inverse des densités : ainsi, un pouce de mercure fait équilibre à-peu-près à 14 pouces d'eau. La jonction des surfaces pourrait bien ne pas se faire sur une ligne horizontale, comme, par exemple, si l'on versait assez d'eau dans le vase pour refouler la colonne de mercure jusqu'en *si* ; mais alors on conçoit que, dans cette action, si les pressions latérales sont égales, de chaque côté, sur les molécules qui sont au centre et dans l'axe du tube, elles ne peuvent plus l'être pour les molécules qui sont au-dessus ou au-dessous. Au bord supérieur en *s*, la pression de l'eau l'emporte, et au contraire au bord inférieur en *i*, c'est la pression du mercure; la surface de jonction tend à prendre la figure *s' i'*, et l'eau finit par passer dans la petite branche, et le mercure dans la grande, jusqu'à ce qu'enfin il s'établisse un autre équilibre.

Dans les tubes qui ont moins d'une ligne d'ouverture, cet effet ne se produit pas : les colonnes sont trop étroites pour se *diviser*, la cohésion des molécules de chaque liquide suffit pour résister à l'inégalité de pression qui existe entre le bord supérieur et le bord inférieur.

61. *Du niveau des mers.* — Les principes de l'hydrostatique ne trouvent pas seulement leur application dans les tubes et dans les vases étroits, sur lesquels nous pouvons expérimenter, mais ils s'appliquent pareillement à tous les liquides qui sont répandus dans la nature.

C'est par les lois précédentes que toutes les eaux de la terre sont nivelées dans les bassins profonds de la mer, et que leur vaste surface conserve tout autour du globe une

forme permanente ; si elle est soulevée par les tempêtes, elle est ramenée par les lois de l'équilibre dans les limites qui lui sont assignées.

Si la terre était immobile et formée de couches homogènes, la surface des mers serait rigoureusement sphérique ; les navigateurs qui passent sous la ligne, ceux qui parcourent des plages inconnues, dans l'un ou dans l'autre hémisphère, et ceux qui visitent les côtes du Groënland ou les mers encore plus voisines du pôle, se trouveraient tous en même temps à la même distance du centre de la terre ; les choses seraient ainsi par les lois de l'hydrostatique, et par la structure des parties solides du globe qui n'offrent à la surface que des saillies insensibles. De grandes inégalités dans les parties solides troubleraient la sphéricité des surfaces liquides : si la chaîne des Cordillières était seulement cent fois plus haute, les eaux seraient montantes sur les côtes de l'Amérique, vers l'Orient comme vers l'Occident; elles seraient descendantes sur les côtes opposées, et les ports de France seraient à sec, aussi bien que ceux du Japon.

Si la terre était immobile, et composée à l'extérieur de parties hétérogènes d'une densité très inégale ; si, par exemple, au-dessous de l'Océan, entre la croûte qui lui sert de fond et le centre de la terre, il se trouvait d'immenses cavernes qui fussent vides ou remplies de substances de faible densité, il est clair que l'intensité de la pesanteur serait beaucoup moindre sur les eaux de l'Océan que sur celles des autres mers, et qu'alors la surface générale des eaux, au lieu d'être sphérique de toutes parts, devrait être renflée dans quelques endroits, et dans d'autres déprimée. Ainsi, une hétérogénéité de substances pourrait à elle seule produire des irrégularités de forme, et, si à cette cause on ajoute l'influence de la force centrifuge, on voit que la question devient encore plus compliquée. Dans l'ignorance où nous sommes sur la composition intérieure du globe, dont, avec toute notre puissance, nous ne pouvons

fouiller qu'une superficie d'une profondeur insensible, il nous est tout-à-fait impossible de déterminer à présent quelle doit être, dans l'état de repos, la véritable courbure de la surface des eaux. C'est pour cela qu'on a essayé de la déterminer par des nivellemens directs, et voici, à cet égard, les résultats auxquels on est parvenu.

Le niveau de la mer Rouge s'élève au-dessus du niveau de la mer Méditerranée de $9^m,9$ dans les hautes mers, et de $8^m,12$ dans les basses mers. Cette différence a été déterminée pendant l'expédition d'Egypte par une commission d'ingénieurs, sous la direction de M. Le Père.

La mer Méditerranée à Barcelonne, et l'Océan à Dunkerque, sont très sensiblement au même niveau, d'après les observations de Delambre.

La mer du Sud au Callao paraît plus élevée de 7^m que l'Océan à Carthagène, d'après les déterminations barométirques de M. de Humbolt.

62. Le mélange des eaux des fleuves avec les eaux de la mer présente aussi quelques phénomènes remarquables d'hydrostatique. L'eau douce, étant plus légère, doit se tenir à la surface, tandis que l'eau salée doit, par sa pesanteur, former les couches les plus profondes. C'est, en effet, ce que M. Stevenson a observé en 1816 dans le port d'Aberdeen, à l'embouchure de la Dee, et aussi de la Tamise, près de Londres et de Wolwich. En puisant de l'eau à diverses profondeurs avec un instrument imaginé pour cet objet, M. Stevenson a trouvé qu'à une certaine distance de l'embouchure l'eau est douce dans toute la profondeur, même à la marée montante; mais que, si l'on descend le cours de la rivière et que l'on approche un peu plus près de la mer, on trouve l'eau douce à la surface, tandis que l'eau de la mer forme les couches du fond. D'après ses observations, c'est entre Londres et Wolwich que pour la Tamise la salure du fond commence à être sensible. Ainsi, au-dessous de Wolwich, cette rivière, au lieu de couler sur

un fond solide, coule véritablement sur le fond liquide formé par les eaux de la mer, avec lesquelles sans doute elle se mêle plus ou moins. Cependant M. Stevenson est d'opinion qu'à la marée montante les eaux douces sont soulevées pour ainsi dire *tout d'une pièce* par les eaux salées qui affluent et qui remontent le lit du fleuve, tandis que l'eau douce continue de couler vers la mer.

Ces expériences tendent à confirmer l'opinion que Franklin avait émise sur ce sujet, dès l'année 1761. « Si quelques rivières, dit-il, se rendent dans des lacs, sans que cependant ceux-ci débordent jamais, c'est que les eaux se répandent alors sous une surface tellement grande, que l'évaporation enlève journellement une masse de liquide à-peu-près égale à celle qui afflue; mais il est des fleuves qui, par l'étendue de leur cours et la largeur de leur embouchure, peuvent être assimilés à des lacs. » Pour que la ressemblance fût parfaite, il suffirait qu'une digue arrêtât le cours des eaux et les empêchât de se rendre à la mer : on trouverait bien alors, suivant les saisons, quelques différences de niveau, mais on conçoit en général que, sous certaines circonstances, ces différences pourraient être renfermées dans des limites assez resserrées. Quoique la communication entre la rivière et la mer soit ouverte, on peut supposer que la digue dont nous venons de parler existe réellement dans la surface de jonction de l'eau douce et de l'eau salée : seulement, cette digue sera mobile; elle remontera d'un certain nombre de lieues à la marée montante, et redescendra ensuite; l'amplitude des excursions pourra varier avec le volume des eaux. Dans quelques cas, on devra aussi s'attendre à trouver que l'eau de la mer et celle de la rivière se mêlent en se rencontrant, et dans une étendue plus ou moins considérable, par le double effet de leurs mouvemens et de la différence des pesanteurs spécifiques; mais, à une certaine distance de l'embouchure, l'eau douce, d'abord entraînée par le courant et refoulée ensuite

par la marée, oscillera à-peu-près dans les mêmes limites et sans jamais atteindre la mer. L'ignorant imaginerait que les eaux coulent et se perdent en partie sous quelques crevasses de la terre, tandis qu'en réalité c'est par l'air qu'elles s'échappent.

CHAPITRE VI.

De l'Équilibre des Gaz et de la Pression atmosphérique.

63. L'AIR est un corps qui ne tombe pas immédiatement sous nos sens, comme les corps solides ou les liquides; mais il se manifeste à nous par tant de phénomènes, sur la terre et sur les eaux, qu'il n'est pas nécessaire de chercher d'autres preuves de son existence. Il y a des orages dans tous les climats et des tempêtes sur toutes les mers; ainsi, le fluide de l'air enveloppe toute la surface du globe, il forme partout une couche d'une grande épaisseur, car, dans tous les pays, sur les montagnes comme dans les plaines, on voit flotter des nuages qui sont emportés par le vent, et au-dessus de ces nuages on voit la couleur brillante du ciel, qui est une preuve de la profondeur de l'air, comme la couleur de l'Océan est une preuve de la profondeur de l'eau. S'il n'y avait pas d'air, le ciel serait sans éclat et sans couleur; il paraîtrait comme une voûte absolument noire, où l'on verrait les astres briller pendant le jour avec le même éclat que pendant la nuit. Cette grande masse d'air, qui est répandue tout autour de la terre, et dont les couches superposées s'élèvent plus haut que les plus hautes montagnes, est ce que l'on nomme l'*atmosphère*. Le sommet le plus élevé de l'Himâlaya ne s'élève pas à deux lieues au-dessus du niveau de la mer, et nous verrons que l'atmosphère s'élève à plus de douze à quinze lieues.

Les découvertes chimiques du dernier siècle nous ont fait connaître plusieurs corps qui sont différens de l'air par leur nature, mais qui sont analogues à l'air par leur transparence, par leur fluidité, et par l'ensemble de leurs pro-

priétés physiques. Tous ces corps ont reçu différens noms : d'abord on les appelait des *airs*, et l'on disait alors : *air méphitique*, *air inflammable*, *air hépatique*, *air fixe*, *air phlogistiqué*, *déphlogistiqué*, etc. ; aujourd'hui tous ces corps sont ce que l'on appelle les *gaz* ou les *corps gazeux* ou les *fluides élastiques*.

64. Les gaz sont soumis à deux espèces de forces, comme les solides et les liquides, savoir : à la force de la pesanteur, et aux forces moléculaires.

65. La pesanteur de l'air, qui avait été soupçonnée autrefois, même avant Aristote, n'a été véritablement démontrée qu'en 1640 par Galilée, et, un peu plus tard, elle a été confirmée par les belles expériences de Torricelli et par les expériences encore plus frappantes de Pascal. Cette vérité fondamentale peut se démontrer directement par l'expérience suivante : on fait le vide dans un grand ballon, au moyen de la machine pneumatique; on le suspend à l'un des bras de la balance, et de l'autre côté on met des poids pour établir l'équilibre. Si, après cela, on ouvre un instant le robinet pour laisser rentrer un peu d'air, l'équilibre est rompu, la balance penche du côté du ballon, et il faut ajouter des poids dans l'autre bassin; si l'on rouvre le robinet encore pendant un instant, il arrive encore une augmentation de poids; et enfin, si on laisse rentrer l'air complètement, on trouve que pour rétablir l'équilibre il a fallu ajouter dans l'autre bassin une somme de poids très sensible. Pour un ballon de 10 litres, la différence des poids est de plus de 10 grammes; ce qui prouve déjà, par une première approximation, que 1 litre d'air dans les circonstances ordinaires pèse un peu plus de 1 gramme, c'est-à-dire que l'eau n'est pas mille fois plus pesante que l'air ordinaire à Paris.

66. Les forces moléculaires agissent dans les gaz tout autrement que dans les solides et dans les liquides. Nous avons vu que ces forces retiennent les molécules des solides

fortement pressées les unes sur les autres, et fixement arrêtées à leur place ; qu'elles retiennent aussi les molécules des liquides, tout en leur laissant une grande liberté de se mouvoir dans tous les sens : mais, dans les gaz, les forces moléculaires sont répulsives, et toutes les molécules, cédant à l'action de ces forces, tendent sans cesse à s'éloigner les unes des autres, et s'éloignent en effet jusqu'à ce qu'elles rencontrent des obstacles qui les arrêtent. Ainsi, l'air qui est renfermé dans un vase fait sans cesse un effort contre les parois pour les presser et les repousser plus loin, et il faut toujours ou que les parois éclatent sous cette pression, ou qu'elles soient assez fortes pour y résister. Cette conséquence semble d'abord contraire à l'expérience, car, s'il est vrai que dans un vase fermé l'air fasse un tel effort contre les parois, il semble nécessaire que cet air s'échappe par la moindre ouverture, et qu'il s'échappe à plus forte raison à l'instant où l'on ouvre le vase, ou même avant que l'on ait eu le temps de le fermer. D'où il suivrait que tous les vases sont vides d'air, tandis que l'on sait bien qu'ils en sont tous remplis, à moins que l'on n'y verse de l'eau ou quelqueautre liquide qui en prenne la place. Pour lever cette difficulté, imaginons un vase de 1 litre de capacité, par exemple, et fermé de toutes parts : s'il était vide et que l'on y fît une ouverture, l'air extérieur se précipiterait à l'instant pour le remplir : au contraire, s'il était plein, que l'on en perçât les parois et qu'il n'y eût pas d'air au-dehors, l'air intérieur sortirait à l'instant : mais, quand il y a de l'air au dehors comme au dedans, l'air extérieur fait pour entrer dans le vase autant d'effort que l'air intérieur pour en sortir, et, entre ces deux pressions égales, l'équilibre subsiste aux points où le vase est ouvert comme aux points où il est fermé par des parois. C'est donc l'air extérieur qui arrête la force répulsive de l'air intérieur.

Cet équilibre des pressions est si remarquable qu'il est bon de le démontrer par une expérience directe. Sous le ré-

cipient de la machine pneumatique on met une vessie à moitié pleine d'air, on donne quelques coups de piston, et l'on voit la vessie qui se gonfle de plus en plus jusqu'à prendre tout le volume dont elle est susceptible ; elle se tend comme si l'on y soufflait de l'air avec une grande force. On voit donc que l'air intérieur qu'elle contient faisait un effort pour repousser les parois, puisqu'il les repousse en effet, dès que, par le jeu de la machine, on enlève du récipient l'air qui arrêtait cet effort. Au lieu d'une vessie on aurait pu mettre sous le récipient un vase de verre très mince, fermé par un bouchon ; alors, en faisant le vide comme tout-à-l'heure, on verrait sauter le bouchon, ou bien peut-être le vase se briserait. Cette pression, que l'air exerce contre les parois des vases qui le contiennent, est ce que l'on nomme *son élasticité*, ou *sa force élastique*, ou *sa tension*.

Un ressort ne devient élastique que quand on le comprime, et il perd sa tension dès qu'il est revenu à son état primitif : mais l'air est toujours dans un état actuel de tension ; il n'y a point pour lui de volume primitif, puisqu'il tend sans cesse à occuper un volume plus grand. Un litre d'air ordinaire serait versé dans un espace vide, de plusieurs milliers de mètres cubes de capacité, qu'il se répandrait partout dans cet espace et qu'il en presserait les parois dans tous les sens, faisant encore un effort pour se répandre plus au large. On conçoit, d'après cela, combien il importe d'étudier les effets de l'air atmosphérique, car sa seule présence est une force active dans tous les phénomènes que nous observons.

67. *Conditions d'équilibre de l'air.* — Il n'y a pour les gaz qu'une seule condition d'équilibre, savoir, que leur force élastique soit la même dans toute l'étendue d'une couche de niveau. Cette condition est analogue à la seconde condition d'équilibre des liquides (64), et elle se déduit des mêmes principes, savoir : de la mobilité des molécules, et de l'action de la pesanteur qui s'exerce sur elles. Dans un vase

quelconque (*pg.* 89), tous les points de la couche horizontale *cd* doivent avoir la même élasticité, car il faut que la force répulsive des molécules qui sont en *b* puisse arrêter la force répulsive des molécules qui sont en *b'* ; et ces forces ne peuvent s'arrêter et se faire équilibre, à moins qu'elles ne soient égales dans tous les points de la couche horizontale *cd*. Il en est de même dans toutes les sections de niveau que l'on peut concevoir, soit au-dessus, soit au-dessous de *cd* ; mais il est évident que la couche *mp*, par exemple, est plus pressée que *cd*, puisqu'elle supporte d'abord toute la pression qui s'exerce en *cd* et qui lui est transmise par le principe d'égalité de pression, et qu'en outre elle supporte encore tout le poids de l'air qui est compris dans la colonne *cdmp* et qui pèse librement sur elle comme une colonne d'eau pèse sur le fond d'un vase.

Les conditions de la stabilité et de l'instabilité de l'équilibre sont aussi les mêmes que dans les liquides, et pour les mêmes raisons : l'équilibre est stable quand la densité de l'air inférieur est plus grande que celle de l'air supérieur, et il est instable quand le contraire a lieu. Mais l'équilibre instable, quoique mathématiquement possible, est toujours physiquement impossible, à cause de la grande mobilité des molécules des gaz.

Cette loi de l'équilibre de l'air est une loi universelle pour toutes les masses gazeuses, quelque petites ou quelque grandes qu'elles puissent être ; elle s'applique à l'air contenu dans un grand édifice comme à celui qui est contenu dans un vase de petites dimensions ; elle s'applique à toute la colonne d'air atmosphérique qui repose sur une vaste plaine ; et elle s'applique, enfin, à la masse entière de l'air qui constitue l'atmosphère. Que l'on conçoive à une hauteur quelconque, à la hauteur du Mont-Blanc, par exemple, une couche atmosphérique qui enveloppe la terre et qui soit parallèle à la surface des eaux, il faudra pour l'équilibre que tous les points de cette couche supportent partout

la même pression, à Paris comme aux antipodes, sur les continens comme sur les mers, et dans les régions des pôles comme dans celles de l'équateur. Une seconde couche parallèle à celle-là, mais qui serait à cent mètres au-dessous, devrait, par la même raison, avoir tous ses points également pressés entre eux, et tous se trouveraient plus pressés que ceux de la première couche, du poids entier de la colonne d'air de cent mètres qu'ils supportent de plus. Ainsi, à hauteur égale, la pression doit être égale ; mais elle diminue à mesure que l'on s'élève. La nécessité d'une pression uniforme, dans une si grande étendue, fait assez comprendre que, dans l'océan de l'air, tout équilibre est impossible. Un calme universel est incompatible avec tant de mobilité, puisqu'un seul point ébranlé met toute la masse en agitation.

Les gaz ne peuvent pas, comme les liquides, avoir une surface libre sur laquelle aucune pression ne soit exercée, car nous avons dit qu'il faut un obstacle pour arrêter leur force expansive, qui est indéfinie. D'après cela, on pourrait conclure que l'atmosphère n'est pas bornée à douze ou quinze lieues, comme on le dit communément, puisqu'à cette limite les molécules de l'air toujours poussées par leur force élastique, et ne trouvant rien qui les arrêtât, se précipiteraient dans le vide et se dissiperaient de plus en plus, jusqu'à remplir enfin toute l'immense étendue des cieux. Ainsi, l'air serait partout ; il envelopperait la lune comme la terre, il envelopperait le soleil et les planètes, et il formerait autour de ces astres des atmosphères analogues à l'atmosphère terrestre. Nous démontrerons en optique que les phénomènes observés ne justifient point ces conclusions ; et, sans expliquer à présent les causes probables qui retiennent les molécules de l'air, nous adopterons l'opinion que notre atmosphère est limitée et qu'elle n'a en effet que douze ou quinze lieues d'étendue. Au-delà est le vide ; la dernière couche de l'atmosphère est la dernière limite de la masse pondérable de la terre.

63. *De la pression de l'air.* — Les conditions générales de l'équilibre étant une fois posées, nous pouvons constater, par des expériences directes, que toutes les couches inférieures de l'air sont en effet pressées par les couches supérieures, et qu'elles le sont diversement suivant la hauteur à laquelle on s'élève au-dessus du niveau de la mer.

Expérience du crève-vessie. — On met sur la platine de la machine pneumatique une espèce de manchon de verre (*fig.* 90), dont les parois sont très épaisses, et qui est fermé à sa partie supérieure par une membrane de vessie, très bien tendue et fortement arrêtée sur ses bords. Cette membrane éprouve, d'une part, la pression de l'air extérieur qui tend à l'abaisser, et, de l'autre, la pression de l'air intérieur qui tend à la soulever; de telle sorte qu'elle reste en équilibre entre ces deux pressions opposées. Si, par quelque moyen, on soufflait dans le vase une nouvelle quantité d'air, la pression intérieure deviendrait la plus forte, et la membrane se renflerait en dehors : au contraire, si on enlève de l'air, la pression intérieure deviendra plus faible, et la membrane, cédant à la pression extérieure, devra fléchir et s'enfoncer en dedans. C'est là l'effet qu'on obtient en faisant jouer la machine pneumatique, car elle aspire peu-à-peu tout l'air qui est contenu dans le vase : dès les premiers coups de piston, on voit la membrane fléchir sous la pression extérieure, puis elle fléchit de plus en plus; enfin, quand le vide est fait, on voit qu'elle est très étendue, et par conséquent très pressée. On peut juger qu'un poids de 100 kilogrammes, qui serait posé sur elle, lui donnerait moins de tension. Alors, si l'on donne avec le doigt un coup, même très léger, au milieu de la membrane, elle éclate en mille pièces, et l'on entend une explosion plus forte qu'un coup de pistolet, tant est grand l'effort que fait l'air, en vertu de sa pression, pour rentrer dans le vase, car c'est en rentrant avec impétuosité qu'il produit tant de bruit.

Au lieu d'une pression de haut en bas, on aurait une

pression latérale si le crève-vessie était incliné, ou une pression de bas en haut s'il était renversé; toutes ces pressions ne produiraient pas moins d'effet que la première, ce qui prouve bien que l'air presse dans tous les sens, ou que les pressions se transmettent et deviennent aussi des pressions de bas en haut, comme il arrive dans les liquides.

Cette expérience semble d'abord très étonnante; on ne comprend pas comment l'air d'un appartement peut exercer une pression si prodigieuse. Il faudrait qu'il fût bien pesant s'il n'agissait que par sa pesanteur, car une colonne d'eau qui aurait toute la hauteur de l'appartement serait bien loin de produire un tel effet. C'est qu'aussi il y a une autre cause. Supposons, pour un moment, que l'expérience ait été faite en plein air : alors, d'après les principes de l'hydrostatique, la pression serait égale au poids de la colonne d'air ayant pour base la largeur de la membrane, et pour hauteur, non pas un mètre, ni dix mètres, ni cent mètres, mais toute la hauteur de l'atmosphère; dix lieues si l'atmosphère a dix lieues, cent lieues si l'atmosphère en a cent. Puisque sur une même couche de niveau les pressions sont toujours égales, on voit que dans un appartement la pression qui s'exerce sur le crève-vessie est aussi toute la pression atmosphérique.

En mesurant cette pression, qui fait éclater avec tant de bruit la membrane du crève-vessie, on aurait tout le poids d'une colonne d'air qui s'élève aussi haut que l'atmosphère peut s'étendre; de même qu'un physicien pourrait, au fond de la mer, avec un appareil semblable, trouver le poids total de la colonne d'eau qui s'éleverait au-dessus de sa tête.

69. *Mesure de la pression atmosphérique.* — Puisque l'atmosphère enveloppe la terre, elle en presse tous les points, comme elle presse la membrane du crève-vessie; elle presse également toute la surface des continens et toute la surface des eaux, soit dans l'immense étendue des mers, soit dans les lacs, soit dans les vases qui servent à nos expériences.

Supposons qu'un tube plonge par une de ses extrémités dans un vase rempli d'eau (*fig.* 91) : le liquide se met au même niveau dans le tube et dans le vase, parce que la pression atmosphérique est la même, dans l'intérieur du tube en *c d*, et au dehors sur la surface *a b*. Mais, si l'on aspire une partie de l'air contenu dans le tube, le liquide monte comme s'il était lui-même aspiré ; il monte de plus en plus à mesure que l'aspiration continue ; il s'arrête quand elle cesse, et la colonne soulevée reste suspendue dans l'intérieur du tube. Cette expérience, qui n'est qu'un jeu d'enfant, va nous donner le moyen de mesurer la pression atmosphérique, et de trouver le poids total de l'air, comme si nous pouvions mettre toute l'atmosphère dans une balance. En aspirant l'air, on diminue la pression qui s'exerce dans l'intérieur du tube, sans rien changer à la pression extérieure ; celle-ci, étant alors la plus forte, elle force le liquide à monter jusqu'à ce que la condition d'équilibre soit remplie, c'est-à-dire jusqu'à ce que la pression soit la même sur toute la couche de niveau, aussibien à l'intérieur en *c d* qu'à l'extérieur *a b*. Au moment où ces pressions sont égales, le liquide cesse de monter ; mais la pression intérieure qui s'exerce sur *c d* se compose de deux parties : de la pression due au poids de la colonne soulevée, et de la pression due à l'élasticité de l'air qui reste au-dessus du sommet de cette colonne. Ainsi, en diminuant de plus en plus l'élasticité de l'air, l'eau intérieure doit s'élever de plus en plus ; et enfin, si l'on épuise l'air complètement, il faudra qu'elle s'élève à tel point qu'à elle seule elle presse *c d''* autant que l'atmosphère presse au dehors sur *a b* ; il faudra donc que le poids de cette colonne d'eau soit égal au poids d'une colonne d'air de même base, ayant pour hauteur toute la hauteur de l'atmosphère, car, sur chaque centimètre carré de surface, l'air et l'eau ne pressent que par leur poids. Voilà donc le moyen de peser une colonne atmosphérique, quelle que soit la hauteur à laquelle elle puisse s'élever ; tout se réduit à

trouver un tube assez long, et à épuiser l'air assez complètement. Pascal en fit l'expérience à Rouen, en 1646; son tube avait 46 pieds de long, et pour s'éviter la peine d'en épuiser l'air peu-à-peu, ce qui aurait été impossible en ce temps-là, il le fit sceller à un bout, le remplit de vin, et ferma l'autre bout avec un bouchon. Alors, par le moyen de cordes et de poulies, le tube fut redressé verticalement, et l'extrémité inférieure fut plongée dans un vase d'eau; au moment où l'on enleva le bouchon qui la tenait fermée, toute la colonne liquide s'abaissa dans le tube jusqu'à ce que son sommet fût à environ 32 pieds au-dessus du niveau de l'eau du vase. Dans les 14 pieds qui étaient au-dessus, il n'y avait point d'air, c'était le vide; ainsi, la colonne liquide faisait à elle seule équilibre à la pression atmosphérique; d'où il suit qu'une colonne d'eau ou de vin de 32 pieds de hauteur pèse autant qu'une colonne d'air de même base. Ainsi, chaque point de la surface de la terre est pressé comme s'il était recouvert d'une couche d'eau de 32 pieds de hauteur; et nous, qui vivons au fond de l'océan de l'air, nous sommes pressés de toutes parts comme si nous étions au fond d'un lac, avec 32 pieds d'eau au-dessus de nos têtes.

C'est à des fontainiers de Florence que nous devons le premier germe de cette découverte. Ayant eu l'occasion de faire un corps de pompe qui avait plus de 32 pieds de hauteur, ils virent, avec grande surprise, que l'eau ne voulait pas monter jusqu'à son sommet. A cette époque, on expliquait l'ascension des liquides, en disant que la nature avait *horreur du vide*, et qu'elle y poussait les liquides pour le remplir. Les explications par *les causes occultes* n'étaient pas de celles dont Galilée pût se contenter; aussi, dès qu'il eut connaissance du fait observé par les fontainiers, il supposa que la pesanteur de l'air en était la véritable cause. Torricelli, son disciple, en donna la preuve la plus décisive; voici à-peu-près son raisonnement : pour exercer des pressions égales, les colonnes liquides doivent avoir des hauteurs

qui soient en raison inverse de leur densité ; donc, un liquide qui pèserait une fois plus que l'eau, ferait équilibre à l'atmosphère avec une colonne de 16 pieds, et le mercure, qui pèse à-peu-près quatorze fois plus que l'eau, doit faire équilibre avec une colonne qui est la quatorzième partie de 32 pieds, ou environ 28 pouces. C'est une conséquence facile à vérifier : on prend un tube de verre d'une trentaine de pouces, fermé par un bout ; on le remplit de mercure, et ensuite, après l'avoir bouché avec le doigt, on le retourne verticalement pour en plonger l'extrémité dans une cuvette remplie de même liquide (*fig.* 92). Aussitôt qu'on enlève le doigt, la colonne intérieure descend de quelques pouces, puis elle s'arrête ; l'équilibre est établi, et le petit filet de mercure qui reste suspendu dans le tube est une balance qui donne le poids de l'atmosphère. Cet appareil est le *baromètre :* la colonne d'eau de Pascal était un véritable baromètre à eau. Le vide qui est au-dessus de la colonne barométrique s'appelle le *vide barométrique*, ou le *vide de Torricelli.*

Nous pouvons à présent mettre une grande exactitude dans nos résultats. La *hauteur* du baromètre est la hauteur verticale du sommet *s* (*fig.* 92), au-dessus du niveau *ab*; elle n'est pas la même dans tous les lieux, mais sur les bords de la mer elle est ordinairement de 76 centimètres. Ainsi, pour un centimètre de base, la colonne soulevée a un volume de 76 centimètres cubes; et son poids, qui est égal au volume multiplié par la densité, est par conséquent de $76 \times 13,59$, ou de 1^k, 033, car la densité du mercure est de 13,59. La colonne d'air atmosphérique qui repose sur la mer, et qui a un centimètre de base, a donc, dans toute sa hauteur, un poids de 1^k, 033 : on peut même pousser plus loin le calcul, et trouver le poids de la masse entière de l'air qui compose l'atmosphère, car, autant il y a de centimètres carrés dans la surface de la terre, autant il y a de fois 1^k,033

dans le poids total de l'air. Le rayon du globe étant de 6366745 mètres, sa surface est d'environ 100 mille myriamètres; sur chaque myriamètre le poids est d'un million de millions de tonnes, de chacune mille kilogrammes; ainsi, le poids total de l'air est de cent mille millions de millions de tonnes. Voilà donc le poids total de l'air, des vapeurs, et des exhalaisons de toutes sortes qui composent l'atmosphère. Il sera curieux d'examiner, comme nous le ferons plus tard, si cette masse de substances gazeuses éprouve des variations accidentelles ou des variations séculaires, et si elle a sensiblement changé depuis que Torricelli et Pascal l'ont pesée pour la première fois.

70. *Construction du Baromètre.*— On donne à cet instrument des formes différentes suivant l'usage auquel on le destine; mais il y a quelques conditions générales d'exactitude qu'il faut toujours remplir, quelle que soit la forme que l'on adopte.

1° Il faut que le mercure soit très pur, parce que sa densité s'altère avec sa pureté.

2° Quand la colonne monte ou descend dans l'intérieur du tube, la surface extérieure s'abaisse ou s'élève, et il faut disposer l'appareil pour qu'on puisse à chaque instant mesurer la hauteur du baromètre, c'est-à-dire la hauteur verticale du niveau intérieur au-dessus du niveau extérieur.

3° Il faut que le vide soit parfait au-dessus du sommet de la colonne barométrique, car, s'il restait un peu d'air dans cet espace, ou, s'il y avait quelques vapeurs, ce serait une force élastique qui agirait sans cesse pour repousser le mercure, et qui l'empêcherait de monter à son vrai niveau.

Pour obtenir le vide aussi exactement qu'il est possible, on fait bouillir le mercure de la manière suivante (*fig.* 88); on remplit le tube au tiers de sa longueur, et on le fait

bouillir à plusieurs reprises dans toute cette étendue : ensuite on verse une nouvelle quantité de mercure qui soit un peu chaud, pour ne pas faire éclater le tube, et on recommence l'ébullition dans toute la longueur de cette nouvelle colonne; on ajoute ainsi de nouvelles quantités de mercure, que l'on fait successivement bouillir jusqu'à ce qu'enfin l'ébullition ait parcouru toute la longueur du tube ou à très peu près; alors, on achève de le remplir avec du mercure bouilli, et le baromètre est terminé. Cependant, il est bon de vérifier si, par le retournement, on n'aurait pas laissé entrer quelques bulles d'air; il faut, pour cela, incliner le tube un peu vivement pour que le mercure vienne en frapper le sommet : s'il donne un coup sec, on peut espérer que le vide est assez bien fait, sinon l'opération est certainement manquée.

Quand toutes ces conditions sont remplies, il y a encore, en général, deux corrections à faire pour avoir la hauteur du baromètre : l'une est relative à *la capillarité*, et l'autre à *la température* à laquelle se trouve le mercure au moment de l'observation. Nous donnerons, dans la Météorologie, les tables nécessaires pour faire les corrections qui dépendent de ces causes.

On distingue deux sortes de baromètres : les *baromètres-à-siphon* et *les baromètres-à-cuvette*. Les premiers sont ceux dont le tube est recourbé à sa partie inférieure en forme de siphon (*fig.* 93), tandis que, dans les derniers, le tube est tout droit et plonge par son extrémité dans une cuvette plus ou moins large (*fig.* 92 et 101).

71. *Le baromètre ordinaire* est un baromètre-à-siphon (*fig.* 93), porté sur une monture en bois ; *l'échelle des hauteurs* est ordinairement en métal ; le *zéro* de sa division est fixe, et il se trouve au niveau du mercure de la courte branche ; ce niveau changeant quand le baromètre change, il en résulte des erreurs d'autant plus grandes que la courte branche est plus étroite. Quelquefois le coude du

siphon est en fer et il porte un robinet de même métal : alors, pour transporter cet instrument, on l'incline d'abord de manière que la branche fermée se remplisse complètement de mercure; puis l'on ferme le robinet, et l'on a moins à craindre que l'air ne pénètre dans le tube par les secousses du voyage.

72. *Le baromètre à cadran de Jecker* est en même temps plus commode et plus exact que le baromètre ordinaire; il est représenté dans les figures 98 et 100. La branche ouverte du siphon porte un flotteur en fer muni d'une très fine crémaillère *a*, qui engrène dans une roue dentée *b*, dont l'axe très mobile porte l'aiguille *c*, qui parcourt les divisions du cadran *d* ; il est très facile de graduer cet instrument de manière que la véritable hauteur du baromètre, à un instant donné, se trouve écrite au point où l'extrémité de l'aiguille s'arrête. Ce même baromètre, disposé et suspendu convenablement (*fig.* 99) devient un *baromètre marin*, qui donne de bonnes observations à bord, malgré les oscillations du bâtiment.

73. *Le baromètre de M. Gay-Lussac*, tel qu'il est aujourd'hui construit par M. Bunten, est exclusivement adopté par les voyageurs, comme étant parfaitement exact, facile à observer, et surtout facile à transporter; il est représenté dans les figures 94 et 95 : la branche ouverte n'est percée que d'un trou capillaire *a*, bien assez grand pour laisser entrer l'air librement, mais trop petit pour laisser sortir le mercure ; il en résulte qu'on peut le renverser sans craindre que le mercure s'échappe. Lorsqu'après l'avoir renversé pour le transporter, on le retourne pour faire une observation, il n'y a pas à craindre non plus que l'air pénètre dans la branche fermée et arrive au sommet de la colonne de mercure pour la déprimer : M. Bunten y a pourvu par une disposition ingénieuse qui est représentée dans la figure 96. Les divisions sont tracées au diamant sur la branche ouverte et sur la branche fermée, et il n'y a aucune correction à faire pour la capillarité, parce que

ces deux branches sont égales. Ce baromètre se monte dans une canne ou dans un étui en fer-blanc (*fig.* 97).

74. *Baromètre de Fortin.* — Le baromètre de Fortin (*fig.* 101, 102, 103 et 104) est un baromètre-à-cuvette; ce qui le distingue, c'est qu'il est à niveau fixe : ce niveau est marqué par l'extrémité d'une pointe d'ivoire; la cuvette a un fond mobile; il suffit de tourner la vis *v* dans un sens ou dans l'autre pour faire monter le niveau ou pour le faire descendre; en même temps qu'on la tourne, on observe l'image de la pointe d'ivoire qui se réfléchit sur la surface brillante du mercure, et il est facile d'amener le niveau exactement en contact avec l'extrémité de la pointe : c'est par là qu'on commence toutes les observations. Le tube de métal qui enveloppe le tube de verre est fendu des deux côtés vers sa partie supérieure, et il porte des divisions qui sont comptées de l'extrémité même de la pointe, de telle sorte qu'il suffit de diriger par les deux fentes un rayon visuel qui rase la surface de la colonne, et de voir à quelle division il correspond. Pour éviter les erreurs que l'on pourrait commettre en s'écartant au-dessus ou au-dessous de la ligne horizontale, il y a un curseur *c* qui glisse sur le tube de métal, et qui n'est fendu que dans une petite partie de sa longueur; la fente qui est en avant et celle qui est derrière se terminent par deux plans de même niveau, perpendiculairement à la longueur du tube. On abaisse le curseur jusqu'à ce que le rayon visuel qui rase ces plans rase pareillement le sommet de la colonne; alors, il suffit de voir à quelle division du tube correspondent les plans, ce qui est très facile parce qu'ils forment le *zéro* du nonius du curseur. De cette manière on peut avoir la hauteur du baromètre à moins de $\frac{1}{20}$ de millimètre.

75. *Variations du Baromètre.* — Nous ne savons rien de ce qui se passe dans les hautes régions de l'air; ici, à la surface de la terre, nous observons des changemens de température, tantôt périodiques, tantôt brusques et inattendus; nous observons des vents et des orages, mais nous ne pou-

vous juger des secousses atmosphériques que jusqu'à la hauteur où l'agitation des nuages nous en permet l'observation. Au moyen du baromètre nous serons instruits de ce qui se passe dans toute la hauteur de l'atmosphère ; car il nous donne à chaque instant le poids de la colonne d'air, et c'est exactement comme si nous avions toute cette colonne en équilibre dans une balance.

On présume bien, d'après cela, que dans un même lieu le baromètre ne reste pas stationnaire dans le cours d'une année, et qu'il éprouve des variations plus ou moins considérables : en effet, à Paris, par exemple, il n'y a presque pas de jours où il ne change de plusieurs millimètres. En général, on distingue deux sortes de variations dans le baromètre : les variations *accidentelles*, et les variations *horaires* : celles-ci se reproduisent très régulièrement à des heures marquées, et sont d'une grandeur constante ; les autres surviennent irrégulièrement sans qu'on en puisse prévoir ni l'époque ni l'étendue.

76. *Hauteurs moyennes.* — Comme les variations ne sont jamais très promptes, si l'on observait le baromètre d'heure en heure, vingt-quatre fois dans la journée, qu'on ajoutât les vingt-quatre hauteurs observées, et qu'on en prît la vingt-quatrième partie, on aurait la *hauteur moyenne du jour* très exactement ; car on aurait le même résultat que si l'on eût observé de demi-heure en demi-heure, ou même de minute en minute. Mais l'on conçoit que, s'il fallait essentiellement passer par les vingt-quatre observations pour avoir la hauteur moyenne d'un jour, il faudrait, quelle qu'en soit l'importance, désespérer d'y arriver jamais. Quel observateur pourrait s'assujétir pendant des années entières à une régularité aussi minutieuse et aussi mécanique ?

Heureusement, M. Ramond a fait voir, par une longue suite d'expériences, qu'il existe une heure de la journée où la hauteur du baromètre est très sensiblement la hauteur moyenne du jour : cette heure est, dans nos climats, l'heure de midi. Ainsi, on est dispensé de faire vingt-quatre obser-

vations dans la journée ; que l'on en fasse une seule avec exactitude à l'heure de midi, et l'on aura la hauteur que l'on cherche. On conçoit qu'en ajoutant les trente hauteurs moyennes des trente jours du mois, et en prenant le trentième de la somme, on aura la *hauteur moyenne du mois*, et qu'en traitant de même les douze moyennes des douze mois, on aura enfin la *hauteur moyenne de l'année*.

M. Ramond a encore démontré que, dans nos climats, le phénomène curieux des variations horaires ne peut ni se démêler, ni se mesurer exactement, à moins que l'on ne détermine encore les moyennes mensuelles et annuelles qui correspondent à certaines heures de la journée. C'est pour cela que les observateurs qui veulent concourir d'une manière utile au progrès de la science observent régulièrement le baromètre quatre fois par jour, et aux heures précises de 9 heures du matin, de midi, de 3 heures du soir et de 9 heures du soir.

A Paris, la hauteur moyenne n'est pas la même pour toutes les années, mais les variations qu'elle éprouve sont très limitées ; en vingt années, de 1816 à 1835, la plus grande différence n'est pas de quatre millimètres, et la moyenne générale est à très peu près de 756 millimètres.

77. *Variations accidentelles.* — Dans nos climats, et surtout dans les régions septentrionales, le baromètre est en oscillation continuelle au-dessus et au-dessous de la moyenne de l'année, et quelquefois il éprouve des secousses presque subites qui le font monter ou descendre de plusieurs centimètres. A Paris, dans sa plus grande élévation, il a atteint une fois 781 millimètres, et, dans sa plus grande dépression, il est tombé une fois à 719 ; et, chose digne de remarque, ces maximum ont eu lieu dans la même année, en février et en décembre 1821.

Les variations du baromètre indiquent un changement présent dans l'atmosphère ; beaucoup de personnes pensent qu'elles annoncent aussi un changement futur, et qu'il suffit

de savoir bien consulter le baromètre, pour prédire à coup sûr la pluie ou le beau temps plusieurs jours à l'avance : c'est une question de météorologie que nous examinerons plus tard. Mais, pour le moment, nous donnerons la mesure d'un autre effet, c'est-à-dire de la différence des pressions que nous éprouvons par les variations barométriques. Ces pressions se déduisent du tableau suivant :

HAUTEUR du baromètre en millimèt.	PRESSION sur un mètre carré en kilogr.	HAUTEUR du baromètre en millimèt.	PRESSION sur un mètre carré en kilogr.	HAUTEUR du baromètre en millimètr.	PRESSION sur un mètre carré en kilogr.
mm	k	mm	k	mm	k
500	6795	600	8152	700	9510
510	6929	610	8287	710	9646
520	7065	620	8425	720	9782
530	7201	630	8559	730	9918
540	7336	640	8695	740	10054
550	7472	650	8831	750	10189
560	7608	660	8967	760	10325
570	7744	670	9105	770	10461
580	7880	680	9238	780	10597
590	8016	690	9374	790	10733

On voit que, le baromètre étant à 780 mill., une surface de 1 mètre carré supporte 10597 kilogr., et que cette énorme charge se réduit à 9782 kilogr. quand le baromètre tombe à 720 ; ainsi, la surface entière de notre corps étant à-peu-près de 1 mètre carré, nous sommes dans ces circonstances soulagés d'un poids de 815 kilogr. Une cause aussi puissante exerce nécessairement une influence sur les fonctions physiologiques, et surtout sur les phénomènes de la respiration et de la circulation ; mais ces effets sont en général si compliqués qu'il faudra sans doute de longues expériences pour parvenir à les démêler.

La hauteur de 600 millimètres est à-peu-près celle qui a lieu au-dessus du Mont-d'Or et à la poste du Mont-Cénis.

Un voyageur qui part du niveau de la mer pour s'élever sur ces montagnes est soulagé d'un poids de 2173 kilogrammes, et il est soulagé de 3539 kilogrammes lorsqu'il arrive en un lieu où le baromètre marque seulement 500 millimètres ; c'est à-peu-près sa hauteur ordinaire au sommet de l'Etna et sur le Mont-Liban. On sait tout ce que les voyageurs racontent des sensations extraordinaires que l'on éprouve sur les hautes montagnes où le baromètre ne marque plus que 400 ou 500 millimètres. On voit de toutes parts un immense horizon, on est soulagé d'un pesant fardeau, on ne respire qu'un air pur et léger, et il semble en effet que l'on ne touche plus à terre.

Les variations accidentelles du baromètre n'ont pas la même étendue dans tous les climats, ni à toutes les hauteurs ; les limites entre lesquelles elles s'accomplissent sont en général d'autant plus écartées l'une de l'autre, que la latitude est plus grande. Dès 1690, le père De Bèze avait reconnu qu'à Pondichéri et à Batavia le baromètre reste immobile, quelles que soient les tempêtes que l'on éprouve : Legentil avait confirmé ces observations; et maintenant il est bien démontré que, dans toute la zone équatoriale, le baromètre est en effet insensible aux secousses atmosphériques, mais qu'il éprouve cependant des variations périodiques et régulières, que l'on appelle variations horaires.

78. C'est vers l'année 1722 que les *variations horaires* du baromètre furent constatées d'une manière certaine par les observations d'un Hollandais dont le nom reste inconnu. Depuis cette époque, plusieurs observateurs ont essayé d'en déterminer l'étendue et les périodes pour différens lieux de la terre. M. de Humboldt a démontré, par de longues séries d'observations très précieuses, que, sous l'équateur, le *maximum* de hauteur correspond à 9 heures du matin ; passé 9 heures, le baromètre descend jusqu'à 4 heures, ou même 4 h. $\frac{1}{2}$ de l'après-midi, où il atteint son *minimum ;* ensuite il remonte jusqu'à 11 heures du soir où il arrive à un

second *maximum*, et il redescend enfin jusqu'à 4 heures du matin. Ainsi, chaque jour, il passe par les deux *minimum* de 4 heures du matin et de 4 heures du soir, et par les deux *maximum* de 9 heures du matin et de 11 heures du soir. Les mouvemens de dépression et d'ascension sont si réguliers qu'ils pourraient servir à marquer les heures, comme les mouvemens de l'horloge. Seulement, ils ont peu d'amplitude ; car ils s'accomplissent dans une longueur que M. de Humboldt évalue à deux millimètres depuis le point le plus haut du matin jusqu'au point le plus bas de l'après-midi.

Dans nos climats, ces variations horaires sont tellement dissimulées par les variations accidentelles, qu'il fallait, pour les découvrir et pour les mesurer, toute la sagacité et toute la précision d'un observateur tel que M. Ramond. Ce n'est que par les moyennes de plusieurs mois d'observations prises avec exactitude et aux heures convenables, que l'on peut trouver les périodes horaires. M. Ramond a reconnu que leurs époques varient avec les saisons. En hiver, le *maximum* est à 9 heures du matin, le *minimum* à 3 heures de l'après-midi, et le second *maximum* à 9 heures du soir.

En été, le *maximum* a lieu avant 8 heures du matin, le *minimum* à 4 heures de l'après-midi, et le second *maximum* à 11 heures du soir.

Au printemps et en automne, les heures *critiques* sont intermédiaires, se rapprochant plus ou moins de celles de l'été ou de celles de l'hiver. L'étendue absolue des variations est un peu moindre qu'à l'équateur. Dans les latitudes les plus élevées, il faut comparer et discuter un plus grand nombre d'observations pour en faire sortir les périodes horaires ; et, sur ce point, la science a beaucoup à désirer.

79. *Loi de Mariotte.* — La loi de Mariotte est la loi de la compressibilité des fluides élastiques ; elle peut s'énoncer ainsi : *Les volumes des gaz sont en raison inverse des pressions qu'ils supportent.* Pour démontrer par l'expérience cette vérité fondamentale, on prend un tube recourbé (*fig.* 105), dont

la courte branche est cylindrique et fermée à son extrémité supérieure, tandis que la longue branche reste ouverte pour recevoir la pression atmosphérique. On y verse du mercure, d'abord en petite quantité ; ensuite, en inclinant le tube pour faire sortir une partie de l'air de la courte branche, on arrive facilement à mettre le mercure au même niveau des deux côtés. Alors, l'air enfermé dans l'espace *ab* se trouve exactement sous la pression atmosphérique ; et si, à partir de ce point, on le force à se resserrer dans la moitié, le tiers, ou le quart de la longueur *ab*, on aura réduit son volume à la moitié, au tiers, ou au quart, parce que le tube est cylindrique. Pour réduire ainsi le volume, on verse du mercure par la branche ouverte, et l'on en verse jusqu'à ce que le sommet de la petite colonne soit parvenu au point *m*, milieu de la longueur *ab ;* ce point *m*, et le point *n* qui lui correspond dans la grande branche, supportent l'un et l'autre la même pression, puisqu'ils sont au même niveau ; cette pression est de deux atmosphères, car elle se compose du poids de la colonne *ns*, que l'on trouve toujours égale en hauteur à la colonne barométrique, et de la pression atmosphérique elle-même qui s'exerce encore au sommet de la colonne. Donc, il a fallu une pression double pour réduire à moitié le volume de l'air contenu dans la courte branche. En donnant à l'appareil une branche ouverte beaucoup plus longue, on démontre de la même manière qu'il faut une pression de trois atmosphères pour réduire le volume au tiers, et de quatre atmosphères pour le réduire au quart de ce qu'il était sous une seule pression atmosphérique. Dans ces limites, cette loi s'applique à tous les gaz. Mais MM. Arago et Dulong ont démontré qu'elle s'applique à l'air sans aucune variation, jusqu'à 27 atmosphères. Voici les moyens qu'ils ont employés pour constater cette vérité.

Les appareils étaient établis au collége Henri IV dans une vieille tour carrée, au centre de laquelle on avait pu facilement élever un mât en bois d'une centaine de pieds de

hauteur. Au pied du mât était un vase de fonte avec un manomètre et une pompe foulante, et contre sa hauteur un tube vertical en verre de 75 à 80 pieds de longueur (il était composé de 13 tubes de 6 pieds mis bout à bout).

On prendra une idée de cette disposition en jetant les yeux sur les *figures* 111, 112 et 113, planche 5.

v est le vase en fonte,

p, la pompe foulante,

mn, le manomètre, fermé à son extrémité supérieure,

t, le tube vertical, ouvert en haut,

a, le mât contre lequel il s'élève.

Si l'on suppose, 1° que le vase de fonte contienne du mercure, 2° que le tube du manomètre soit gradué et contienne de l'air sec, 3° que le mercure s'élève à la même hauteur dans le tube du manomètre et dans le tube vertical *t*, il est évident que l'air sera enfermé sous la pression atmosphérique, et que l'on connaîtra le volume qu'il occupe sous cette pression. Maintenant si, à partir de ce point, l'on fait agir la pompe foulante pour introduire de l'eau au-dessus de la surface supérieure du mercure dans le vase de fonte, on exercera ainsi des pressions toujours croissantes sur l'air sec du manomètre, et en même temps le mercure s'élèvera de plus en plus dans le tube vertical. Enfin, pour avoir à chaque instant le volume de l'air comprimé, il suffira d'observer exactement la longueur qu'il occupe encore dans le tube du manomètre à partir de l'extrémité fermée ; et pour avoir la pression correspondante, il suffira de mesurer la différence des niveaux du mercure dans le tube du manomètre et dans le tube vertical.

On conçoit facilement que des expériences de cette nature exigent toute l'habileté dont MM. Arago et Dulong ont donné tant de preuves par leurs belles découvertes dans toutes les branches de la physique. Il nous serait impossible de décrire ici, dans tous ses détails, la perfection avec laquelle les diverses pièces de l'appareil étaient coordonnées

et toutes les précautions ingénieuses qui avaient été prises pour assurer l'exactitude des résultats. Nous indiquerons seulement quelques-unes des dispositions les plus essentielles de la pompe foulante, du tube vertical, et du manomètre.

Pompe foulante. — Il ne fallait pas seulement que la pompe foulante fût assez bien faite pour injecter l'eau sous une pression de 27 atmosphères, il fallait encore qu'elle pût maintenir l'eau injectée d'une manière assez rigoureuse pour que les sommets des colonnes de mercure fussent parfaitement fixes dans le manomètre et dans le tube vertical. Cette condition était remplie au moyen de la soupape *b*, qui se trouve au bas de la course du piston (*fig.* 113).

Tube vertical. — Il était composé de 13 tubes de cristal ayant 2 mètres de longueur, 5 millimètres de diamètre intérieur et 5 millimètres d'épaisseur; ces tubes étaient réunis par de fortes viroles, comme on le voit en *c*, *figure* 113, et plus en détail dans la *figure* 111. La plaque horizontale *h* sert de repère ; il y en a une pareille au bas de chaque tube, et l'on mesure la distance de deux repères consécutifs en posant une règle divisée *r* sur le repère inférieur et en poussant une petite languette *l*, jusqu'à ce qu'elle se trouve à l'affleurement du repère supérieur. Pour que les tubes inférieurs ne fussent pas surchargés et comme écrasés par le poids des tubes supérieurs, on avait eu soin d'attacher à l'extrémité supérieure de chaque tube des cordons qui redescendaient verticalement après avoir passé sur des poulies, et qui étaient tirés en bas par des poids égaux au poids du tube (*fig.* 113). Ainsi, la colonne n'exerçait aucune pression sur sa base.

Manomètre. — Le tube manométrique était semblable aux tubes de la colonne verticale : seulement il avait été effilé à son extrémité supérieure, gradué avec soin, sans rien tracer au diamant sur sa surface, de peur d'affaiblir sa résistance, et ensuite ajusté sur la platine *e* du vase de fonte. Alors on y avait fait passer pendant long-temps un courant d'air sec,

et enfin on avait scellé à la lampe son sommet effilé, sans faire éprouver une altération sensible à sa graduation. On voit dans la *figure* 112 comment l'extrémité inférieure du tube manométrique est ajustée sur la platine *e* du vase en fonte ; on doit remarquer que la virole se recourbe sous l'épaisseur du tube, afin que la pression ne tende pas à le soulever. Pour que l'air du manomètre fût bien maintenu à la même température, on l'avait enveloppé d'un manchon de verre *h* dans lequel passait continuellement un courant d'eau. Enfin, pour voir avec une grande exactitude la position du sommet de la colonne de mercure, on avait disposé en dedans du manchon un voyant *x* avec une loupe ; cette pièce devait monter et descendre, et on lui donnait ces mouvemens au moyen d'un tourniquet *q* sur lequel était enroulé un fil de soie qui allait passer sur les poulies supérieures *y*, sur la poulie inférieure *z*, et qui venait s'attacher à la garniture du voyant.

Des thermomètres convenablement disposés donnaient à chaque instant la température des diverses parties de l'appareil ; et des baromètres, l'un supérieur et l'autre inférieur, donnaient aussi la pression atmosphérique au sommet et à la base de la colonne verticale.

Tels sont les moyens qui ont servi à démontrer la loi de Mariotte jusqu'à 27 atmosphères, et l'on ne peut guère douter qu'elle ne s'étende au moins jusqu'à 50 atmosphères sans altération sensible.

La densité d'un corps étant en raison inverse du volume qu'il occupe, on peut encore exprimer la loi de Mariotte, en disant que *les densités des gaz sont proportionnelles aux pressions qu'ils supportent.* Sous une seule pression atmosphérique, la densité de l'air étant à-peu-près la 770e partie de la densité de l'eau, il en résulte que, sous une pression de 770 atmosphères, l'air est aussi dense que l'eau. Ainsi, au fond de la mer, à une profondeur de 770 fois 10 mètres, ou de 7700, qui font à-peu-près deux lieues, l'air serait plus

pesant que l'eau, et, quoiqu'à l'état gazeux, il ne pourrait pas s'élever pour venir à la surface. Mais rien ne prouve jusqu'à présent qu'il y ait de l'air au fond de la mer, comme rien ne prouve qu'il y ait un liquide au-dessus de l'atmosphère.

Deux volumes successifs, occupés par un gaz, et les deux pressions correspondantes, forment quatre quantités qui sont en proportion inverse; de telle sorte que, trois étant données, on peut trouver la quatrième. Il en serait de même des deux densités successives, avec les deux volumes ou avec les deux pressions correspondantes.

80. *De la machine pneumatique.* — La machine pneumatique est destinée à faire le vide; elle se compose de deux corps de pompe cylindriques pareils à celui qui est représenté en *a*. (*Fig.* 106.)

b est un piston qui monte et qui descend au moyen de la tige *c*; mais dans toutes ces positions il *tient le vide*, c'est-à-dire que rien ne peut passer entre son contour et les parois du corps de pompe.

s est la soupape du piston; elle est très légère, et s'ouvre de bas en haut; elle se lève quand la pression inférieure est un peu plus grande que la pression supérieure, et, dans le cas contraire, elle reste hermétiquement fermée.

La longue tige *cd* est la soupape du corps de pompe; c'est le piston qui l'ouvre et qui la ferme: quand il monte, il la soulève, le renflement *d* vient s'appuyer contre la plaque supérieure du corps de pompe, et le piston glisse à frottement dur sur toute la longueur de la tige; quand il descend, il l'entraîne avec lui, le tronc de cône *e* tombe dans l'ouverture conique qui est au-dessous, sa base ne fait qu'un seul plan avec le fond du corps de pompe, et le piston vient s'appliquer exactement sur ce plan.

Au fond de l'ouverture conique, le *conduit* de la machine prend naissance; il s'étend ensuite jusqu'en *v*; à cette extrémité il porte un pas de vis propre à recevoir des ballons,

des récipiens, ou d'autres vases dans lesquels on veut faire le vide.

p est la *platine* de la machine pneumatique; elle se compose d'une forte plaque de métal sur laquelle on mastique un plateau de verre de plusieurs lignes d'épaisseur, dont la surface supérieure est *dressée* avec soin et légèrement *doucie*.

h est une *cloche* où l'on fait le vide; son bord inférieur est pareillement dressé et douci, afin qu'il puisse s'appliquer exactement sur la platine. Une légère couche de suif achève d'établir l'adhérence; car il ne faut pas que l'air extérieur puisse pénétrer entre la cloche et la platine.

Supposons que le piston soit au milieu de sa course, que les soupapes soient ouvertes, et que l'air soit sous la pression atmosphérique, dans la cloche, dans le conduit, et dans le corps de pompe; si l'on abaisse le piston, la seconde soupape se ferme, et l'air ne peut plus repasser du corps de pompe dans la cloche; il s'échappe par la première soupape, et il n'en reste plus quand le fond du piston est venu s'appliquer sur le fond du corps de pompe. Alors, le piston étant soulevé, le vide se ferait si les soupapes restaient fermées; mais la seconde soupape s'ouvre, l'air de la cloche arrive pour remplir le vide, et la première soupape reste fermée à mesure que le piston s'élève, parce que la pression intérieure est toujours moindre que la pression extérieure. Si la capacité du corps de pompe est, par exemple, la dixième partie de la capacité de la cloche et du conduit, il arrivera dans le corps de pompe $\frac{1}{11}$ de l'air qu'il faut enlever pour avoir le vide. On rabaisse le piston; la seconde soupape se ferme, et l'air se comprime de plus en plus : bientôt son élasticité l'emporte sur celle de l'air extérieur; il soulève la première soupape et s'échappe dans l'atmosphère. Un autre coup de piston fait sortir encore $\frac{1}{11}$ de l'air restant; puis, en continuant ce jeu alternatif, on fait sortir à chaque coup $\frac{1}{11}$ du reste, puis $\frac{1}{11}$ du reste, et ainsi

de suite. D'où l'on voit que jamais le vide ne se pourra faire, puisqu'en prenant la onzième partie d'une quantité et la onzième partie des restes successifs, on ne peut jamais parvenir à prendre cette quantité tout entière. Mais l'on parvient cependant à réduire l'air de la cloche à une élasticité de plus en plus faible qui peut arriver à n'être plus que de deux millimètres. La rapidité de l'opération dépend du rapport qui existe entre la capacité du corps de pompe et celui de la cloche. Ce rapport étant donné, on peut calculer facilement combien il faut de coups de piston pour réduire l'air à une tension donnée ; et ensuite on peut, par la loi de Mariotte, calculer le poids de l'air qui reste, quand on connaît le poids du volume primitif.

Quand la vide est fait, la pression atmosphérique qui s'exerce sur le piston n'étant plus balancée par aucune pression intérieure, il faut, pour le soulever, faire un effort de $1^k,033$ pour chaque centimètre carré de sa surface, plus encore tout l'effort nécessaire pour vaincre le frottement. Un piston de 1 décimètre de rayon serait aussi difficile à soulever qu'un poids d'environ 300 fois $1^k,033$; ce qui fait plus de 600 livres. Mais dans les machines à deux corps de pompe et à deux pistons, ces pressions se détruisent, et il ne reste à vaincre que les frottemens.

La machine pneumatique est représentée dans son ensemble (*fig.* 107). Les tiges des deux pistons sont à *crémaillères ;* elles engrènent dans le même pignon : quand l'une monte, l'autre descend ; et leur mouvement alternatif est produit par le mouvement alternatif d'une manivelle.

La *clef* de la machine représentée à part en *y* est un robinet qui porte une ouverture ordinaire et une ouverture *latérale* ; celle-ci est conique, et se ferme au moyen d'un bouchon de métal *b*. Quand la machine doit tenir le vide, on tourne l'ouverture latérale du côté des corps de pompe ; et pour *rendre l'air*, on la tourne du côté de la cloche, et ensuite on tire le bouchon de métal.

Le baromètre qui marque à chaque instant la tension de l'air de la cloche s'appelle une *éprouvette*. Quelquefois, c'est un baromètre entier (*fig.* 107); mais, le plus souvent, c'est un baromètre tronqué. Dans ce dernier cas, l'éprouvette est enfermée dans une cloche longue et étroite *r* (*fig.* 106) qui communique au conduit de la machine. Cette communication s'ouvre ou se ferme au moyen d'un robinet. La figure 115 représente une éprouvette isolée, de 7 pouces, qui ne commence par conséquent à descendre que quand la pression de l'air est réduite au quart de la pression atmosphérique; à partir de ce point, elle donne à chaque instant la pression de l'air de la cloche qui est toujours égale à la différence des deux niveaux. Au moment où l'on rend l'air, la pression subite qui s'exerce sur le mercure le refoule avec violence dans la branche fermée, et il est bon d'y ménager un *étranglement*, de peur qu'il n'en brise le sommet.

On doit à M. Babinet un perfectionnement ingénieux, représenté dans la fig. 108, qui permet de faire le vide à moins de 1 millimètre. Le robinet *r*, établi entre les deux corps de pompe et un peu au-dessous de leur fond, porte quatre ouvertures *s*, *t*, *v*, *u*. La première et la seconde vont de part en part, mais elles sont perpendiculaires entre elles, la troisième, *v*, ne traverse que la moitié du robinet, et la quatrième, *u*, qui est dans le sens de sa longueur, communique aux ouvertures *t* et *v*. Au fond du corps de pompe *a* se trouve un conduit courbe qui prend naissance au trou de la soupape conique, et qui aboutit en *b* et *c* dans le boisseau du robinet *r*; au fond du corps de pompe *d* se trouvent deux conduits, l'un qui part du trou de la soupape conique et qui aboutit en *e*, l'autre qui part du fond du corps de pompe et qui aboutit en *g*. Dans la position que représente la figure, en soulevant le piston *a*, on fait le vide à la fois sous la cloche au moyen du conduit *u x*, et sous le piston *d*, au moyen du conduit *g s c*; par conséquent l'équilibre de tension s'établit entre le corps de pompe *d* et

la cloche ; mais, si l'on tourne le robinet *r* d'un quart de tour, les trous *c* et *g* se ferment, le conduit *t* se présente devant les ouvertures *b* et *e*, et la machine fonctionne comme à l'ordinaire. Ainsi, en donnant au robinet *r* sa première position pendant que le piston de *a* se lève, et la deuxième pendant qu'il descend, on doit pousser le vide plus loin qu'on ne peut le faire avec une machine ordinaire.

La machine pneumatique fut inventée vers 1650, par Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg; elle fut, peu de temps après, changée et perfectionnée par un grand nombre de physiciens. Hook plaça le corps de pompe verticalement, Papin ajouta la platine, Hawksbée fit deux corps de pompe au lieu d'un, et ensuite les soupapes furent modifiées d'une infinité de manières.

Otto de Guericke fit avec sa machine l'expérience curieuse des *Hémisphères de Magdebourg*, qui consiste à faire le vide dans un globe de métal dont les deux moitiés sont simplement juxta-posées. Avant que le vide soit fait, les deux *hémisphères* se séparent facilement ; mais, quand il n'y a plus d'air intérieur pour balancer la pression extérieure, l'adhérence est si forte que toute la force d'un homme est insuffisante pour les séparer. En effet, si la section des hémisphères a seulement 1 décimètre de rayon, ou environ 300 centimètres carrés de surface, la pression extérieure qui les unit équivaut à plus de 300 kilogrammes. On met une bande de cuir à la jonction des hémisphères pour favoriser le contact, et il y a un robinet qui s'ouvre pour faire le vide et qui se ferme pour empêcher la rentrée de l'air (*fig.* 122).

On se sert de la machine pneumatique pour faire une foule d'expériences sur les pressions et sur les propriétés des corps organiques ou inorganiques.

On démontre, par exemple, que les corps en combustion s'éteignent dans le vide ; que la fumée tombe comme une masse pesante; qu'il y a de l'air en dissolution dans l'eau;

qu'il reste une couche d'air entre les liquides et les parois des vases qui les contiennent, car cette couche interposée se manifeste par une foule de petites bulles qui grossissent à mesure que la pression diminue; que l'eau froide entre en ébullition; que certains insectes vivent plusieurs jours dans le vide le plus parfait de la machine; que les substances fermentescibles se conservent sans altération, etc., etc. C'est sur cette dernière propriété que repose le procédé de M. Appert pour conserver les substances alimentaires. Ce procédé, exploité en grand dans la plupart des ports de France et d'Angleterre, rend les plus grands services à la marine : nous avons ouvert des boîtes préparées depuis 16 ans qui contenaient des alimens aussi frais que le premier jour.

81. *Machine de compression.* — La machine de compression (*fig.* 109) est destinée à comprimer l'air. Elle se compose de 2 corps de pompe pareils à ceux de la machine pneumatique; la seule différence est dans les soupapes qui s'ouvrent en sens contraire, c'est-à-dire de *haut en bas*. Quand on abaisse le piston, il comprime l'air et le fait passer dans le récipient; quand on le relève, l'air extérieur ouvre la première soupape et entre dans le corps de pompe, tandis que l'air comprimé du récipient presse la seconde soupape, et la tient fermée; enfin, quand on rabaisse le piston, la première soupape se ferme, l'air se comprime de plus en plus, il devient capable d'ouvrir la seconde soupape et passe encore dans le récipient; et ainsi de suite.

L'éprouvette de la machine de compression est un tube droit, fermé à son sommet, rempli d'air, et plongeant par son extrémité inférieure dans une cuvette de mercure. Au commencement de l'expérience, l'air du tube est sous une pression atmosphérique, et le mercure est au même niveau à l'intérieur et à l'extérieur; à mesure que la pression augmente, le mercure monte dans le tube, le volume de l'air se réduit successivement à la moitié, au tiers ou au

quart de ce qu'il était; et, d'après la loi de Mariotte, on juge qu'il est sous une pression de deux, trois ou quatre atmosphères. Dans le récipient, la pression de l'air est plus grande que dans le tube, de toute la hauteur de la colonne de mercure qui s'élève au-dessus du niveau extérieur.

82. Il y a des *pompes de compression* qui sont destinées à être vissées sur divers appareils pour y comprimer de l'air; alors, elles se composent simplement d'un corps de pompe et d'un piston sans soupape. Le corps de pompe présente trois modifications particulières (*fig.* 116); 1° il porte un pas de vis à son extrémité inférieure; 2° il est muni d'une soupape *s*, dont le piston s'approche le plus possible quand il arrive au bas de sa course; 3° vers sa partie supérieure et sur sa paroi latérale, il est percé d'un petit trou *t* (*fig.* 120) qui reste toujours ouvert et qui fait cependant l'office de soupape, parce qu'il est tantôt au-dessus tantôt au-dessous du piston.

Quelquefois, au lieu d'un petit trou latéral, le corps de pompe porte une véritable soupape latérale (*fig.* 116); cette disposition offre l'avantage de pouvoir comprimer des gaz quelconques, car il suffit pour cela de faire communiquer le tube de la soupape au réservoir qui les contient.

83. *Mesure des pressions de gaz contenus dans divers appareils.* — On mesure en général les pressions des gaz par deux moyens : par le moyen des colonnes liquides, ou par le moyen des soupapes. Les appareils à colonne liquide s'appellent des *manomètres*; les soupapes s'appellent, en général, *soupapes de pression*, et *soupapes de sureté* quand elles sont destinées à empêcher les explosions.

Soupapes de pression. — Ces soupapes sont indéfiniment variables dans leurs formes et dans leurs dimensions: tantôt elles ont la forme d'un cône tronqué (*fig.* 110, *a* et *b*); tantôt elles sont un simple plan qui s'adapte très-exactement sur les parois de l'ouverture (*figure c*). Dans tous les cas, elles doivent fermer hermétiquement jusqu'à

l'instant où elles sont soulevées. Pour estimer l'élasticité du gaz qui est capable de les soulever, il faut connaître deux choses : 1° le poids total qui charge la soupape; 2° l'étendue de la surface qui est exposée à la pression verticale du gaz. Supposons que le poids soit évalué en kilogrammes, et que l'étendue de la surface pressée soit évaluée en centimètres carrés : si le poids est, par exemple, de 100 kilogrammes, et la surface de 25 centimètres, chaque centimètre carré supportera 4 kilogrammes; donc, d'après ce que nous avons vu (74), le nombre des atmosphères est égal à $\frac{4}{1033}$ ou à $3^{at},87$, plus encore la pression atmosphérique ordinaire qui s'exerce aussi sur la soupape. Ce même moyen s'applique aux liquides comme aux gaz; c'est celui que l'on emploie pour essayer les tuyaux de conduite et les cylindres des machines à vapeur.

Manomètres. — Le nom de manomètre avait été donné, par Varignon, à un appareil qu'il destinait à mesurer la raréfaction de l'air. Maintenant, on appelle *manomètre* tout appareil à colonne liquide propre à mesurer des pressions. Le baromètre mesure la pression libre de l'atmosphère ; le *manomètre* mesure la pression des fluides contenus dans les espaces fermés. L'éprouvette de la machine pneumatique et celle de la machine de compression sont de véritables manomètres. Cependant on peut établir quelques distinctions dans les appareils de cette espèce.

La *figure* 124 représente un manomètre, au moyen duquel on mesure la tension des gaz contenus dans le ballon *b*. Il a été employé par De Saussure, et ensuite par Berthollet, dans les recherches importantes qu'ils ont faites l'un et l'autre sur la végétation et sur les phénomènes des corps vivans. Les animaux et les plantes étaient renfermés dans le ballon *b*.

Les *tubes de sûreté* sont des manomètres qui indiquent la tension des gaz contenus dans les appareils auxquels ils sont adaptés. Quand la tension est égale à la pression atmosphé-

rique, le liquide est au même niveau dans les deux branches (*fig.* 114); et, en général, la différence des niveaux mesure la différence des pressions ; il suffit de connaître la densité du liquide contenu dans le tube pour évaluer cette différence de pression en millimètres de mercure.

Les tubes de sûreté ont été inventés par Welter : ils sont d'un grand usage en chimie, parce qu'ils empêchent les *explosions* et l'*absorption*. Quand la pression intérieure devient trop faible, l'air atmosphérique refoule le liquide dans la boule et pénètre dans l'appareil : au contraire, quand elle est trop forte, elle chasse la colonne liquide et trouve une issue par le tube.

Quand les pressions doivent être très-fortes, on emploie un manomètre analogue à celui de la machine de compression.

84. *Fusil à vent* (*fig.* 117, 118, 119 et 120). — Il suffit de nommer cet appareil pour que l'on en devine le mécanisme. La crosse contient un réservoir à soupape dans lequel on comprime de l'air sous huit ou dix atmosphères. On y ajoute un canon qui reçoit le projectile et qui en dirige le mouvement. On fait partir une détente qui presse la soupape : l'air sort avec violence, chasse la balle, et la soupape se referme à l'instant. On peut tirer de suite plus ou moins de coups, suivant que le réservoir est plus ou moins grand. Le fusil à vent peut lancer la balle avec autant de vitesse que le fusil à poudre. Cet effet ne se produit pas sans bruit ni sans lumière. L'air comprimé, se débandant subitement, fait une explosion pareille à celle du crève-vessie ; et, à l'extrémité du canon, on voit un jet de flamme qui est produit par le frottement des petites poussières solides que l'air rencontre ou qu'il emporte avec lui ; car il paraît que dans un air très-pur il n'y a plus de flamme perceptible.

CHAPITRE VII.

De l'équilibre des corps flottans et des corps plongés dans les fluides.

85. On voit des corps pesans, qui se meuvent en sens contraire de la pesanteur : le liége, le bois, et beaucoup d'autres corps remontent quand ils sont plongés dans l'eau ; le fer remonte de la même manière, quand il est plongé dans le mercure ; la fumée s'élève dans l'air, les nuages restent suspendus dans l'atmosphère, à peu près comme les vaisseaux restent flottans à la surface des eaux. Tous ces phénomènes, ainsi que ceux de l'aérostatique et de l'ascension des ballons, dépendent d'un seul principe, que l'on appelle *le principe d'Archimède*, parce qu'Archimède en est l'inventeur. A l'occasion de cette découverte, il fut, dit-on, saisi d'une si grande joie, qu'il sortit du bain, et parcourut les rues de Syracuse, en s'écriant : *Je l'ai trouvé, je l'ai trouvé.*

86. *Le principe d'Archimède* peut être énoncé de la manière suivante : *un corps plongé dans un fluide y perd une partie de son poids égale au poids du fluide qu'il déplace.*

Pour prendre une première idée de ce principe général, concevons un grand vase rempli d'eau, et, dans l'eau, un cube dont la face supérieure et la face inférieure soient horizontales. Il est évident, d'après les principes d'hydrostatique : 1° que les pressions latérales sont égales et contraires, et qu'elles se détruisent l'une l'autre ; 2° que la face supérieure supporte de *haut en bas* une pression égale au poids de la colonne liquide qui repose sur elle ; 3° que la face inférieure supporte de *bas en haut* une pression égale au poids de la colonne liquide qui reposerait sur elle, si le

cube était lui-même de l'eau. Cette seconde pression l'emporte, sur la première, de tout le poids de la colonne liquide que déplace le cube; donc le cube est repoussé en haut avec une force égale à cet excès de pression ; donc enfin il perd une partie de son poids égale au poids du volume liquide qu'il déplace. La pression de bas en haut, diminuée de la pression de haut en bas, est ce que l'on appelle *la poussée du fluide*. Ainsi, un corps plongé est soumis à deux forces contraires : à son poids, qui tend à le faire descendre ; et à la poussée du fluide, qui tend à le faire remonter. Si ces deux forces sont égales, le corps reste en équilibre ; il a perdu tout son poids. Si la poussée du fluide est la plus grande, le corps est repoussé jusqu'à la surface. Enfin, si elle est la plus faible, le corps tombe au fond du vase. Cette proposition peut se démontrer directement au moyen de la *balance hydrostatique*, qui n'est autre chose qu'une balance ordinaire, destinée à peser les corps, d'abord en les laissant dans l'air, et ensuite en les plongeant dans un fluide. *c* (*fig.* 123) est un cylindre creux en cuivre, dont le cylindre massif *p* peut remplir exactement la capacité ; on les met ensemble dans l'un des bassins de la balance, et, dans l'autre bassin, on met des poids *d* pour établir l'équilibre. Cela fait, on met la balance au repos, et l'on fait plonger le cylindre *p* dans un vase plein d'eau ; on trouve ainsi qu'il a perdu de son poids, car dans cette seconde pesée la balance est loin d'être en équilibre. Alors, si on verse de l'eau dans le cylindre *c*, de manière à le remplir exactement, l'équilibre est rétabli ; donc, en plongeant dans l'eau, le cylindre *p* perd une partie de son poids égale au poids du liquide qu'il déplace.

Voici une autre démonstration du principe d'Archimède, qui est tout-à-fait indépendante de la forme du corps plongé.

Dans l'intérieur de la masse fluide, concevons un volume quelconque, une sphère, par exemple, qui ait un mètre de

rayon. Imaginons que les molécules d'eau, qui sont actuellement comprises dans ce volume, soient congelées pour un moment, c'est-à-dire qu'elles forment une sphère solide au lieu d'une sphère liquide; mais que, dans l'acte de la congélation, elles ne soient ni éloignées, ni rapprochées l'une de l'autre, et qu'elles conservent exactement leurs positions et leurs distances. Il est évident que la sphère solide qui en résulte restera suspendue et en repos, comme faisait la sphère liquide ; car l'adhérence que nous venons d'établir entre les diverses molécules ne peut ni les soutenir ni les faire tomber, elle ne change rien aux pressions ni à la pesanteur. Cette sphère solide et pesante a donc perdu son poids puisqu'elle ne tombe pas, et elle l'a perdu parce qu'elle est environnée d'un fluide qui la presse de toutes parts. Donc, de l'ensemble des pressions inégales qui s'exercent en tous les points de sa surface, résulte une force unique, agissant de bas en haut, et précisément égale au poids de la sphère entière ; ce raisonnement s'applique à un corps de forme quelconque.

Or, quelle que soit la forme du corps qui se congèle, comme nous le supposons, une fois qu'il est congelé, on pourrait le tourner d'une manière quelconque autour de son centre de gravité, et dans toutes les positions il resterait en équilibre. Donc la force de bas en haut, ou *la poussée du fluide*, est une force qui a son point d'application au centre de gravité du fluide congelé ; ce point s'appelle *le centre de pression*.

Si, au lieu de la substance fluide elle-même que nous supposons congelée, nous imaginons dans l'intérieur du fluide un corps étranger de substance quelconque, de liége, de marbre ou de fer, il est évident qu'il supportera de la part du fluide environnant les mêmes pressions qu'une masse congelée qui aurait la même forme que lui. Donc la poussée du fluide et le centre de pression ne dépendent que de la quantité et de la forme du liquide déplacé, sans dé-

pendre en aucune manière de la substance qui déplace le liquide.

Ainsi, un corps plongé dans un fluide est toujours soumis à deux forces dont nous connaissons maintenant les grandeurs, les directions et les points d'application : la première de ces forces est le poids du corps, qui agit de haut en bas, et qui est appliqué au centre de gravité de sa masse ; la seconde est la poussée du fluide, qui agit de bas en haut, et qui est appliquée au centre de gravité du fluide déplacé : de là résultent des conditions d'équilibre et des conditions de stabilité ou d'instabilité, que nous allons déterminer.

87. *Conditions d'équilibre des corps plongés.* — Il y a deux conditions qui doivent être remplies, pour qu'un corps soit en équilibre au milieu d'un fluide, il faut : 1° que le poids du corps soit égal au poids du fluide déplacé ; 2° que le centre de gravité du corps et celui du fluide déplacé se trouvent sur une même verticale. Ces conditions se déduisent de ce qui précède, mais nous pouvons les rendre encore plus sensibles par un exemple. *lspn* (*fig.* 125, *a*) est une sphère composée de deux parties ; l'une, *lsn*, qui est de liége, et l'autre, *spn*, qui est de plomb. Son centre de gravité est en *g*, et son poids est précisément égal au poids de l'eau qu'elle peut déplacer. Si on l'ajuste dans l'eau de manière que la section *s n* soit verticale (*figure b*), elle sera soumise à deux forces parallèles, égales et contraires, qui formeront un couple, savoir, à son poids *gv*, et à la poussée du fluide *cf*; et l'équilibre n'aura lieu que quand le couple sera déployé comme dans la *figure a*, ou reployé sur lui-même comme dans la *figure c*. Dans le premier cas l'équilibre est stable, et il est instable dans le second.

Quand le corps est homogène, son centre de gravité coïncide avec le centre de pression, et la première condition d'équilibre est alors la seule nécessaire. On peut même

l'exprimer autrement en disant que le corps et le fluide qui l'entoure doivent avoir la même densité. Une boule de cire reste suspendue au milieu de l'eau; elle tombe dans l'alcool, et elle nage sur le mercure, parce que sa densité est à-peu-près égale à celle de l'eau, plus grande que celle de l'alcool, et beaucoup moindre que celle du mercure.

Les poissons paraissent être en équilibre dans l'eau où ils vivent, car ils peuvent s'y tenir en repos sans être entraînés par leur poids ni rejetés par la poussée du fluide. Ainsi un poisson pèse précisément autant que l'eau qu'il déplace; il pèse un kilogramme s'il déplace un litre, et mille kilogrammes s'il déplace mille litres ou un mètre cube. Une baleine de 20 mètres de long déplace à peu près 500 mètres cubes, et pèse en conséquence 500 mille kilogrammes; et même un peu plus à cause que l'eau de mer est un peu plus pesante que l'eau douce.

S'il est nécessaire que les poissons soient en équilibre pour n'être pas condamnés à se soutenir par un mouvement continuel au-dessus des profondeurs de la mer, il est nécessaire aussi que leur équilibre ne soit ni instable, ni inindifférent; et cette condition est remplie par un organe particulier qui sert aussi à d'autres usages, car dans l'organisation des êtres il n'y a pas une pièce qui n'ait qu'une seule fin. Cet organe est la vessie natatoire. Il a diverses formes dans les différentes espèces, mais il est toujours placé pour alléger les parties supérieures et pour laisser plus de poids aux parties inférieures. De cette manière, le centre de gravité du corps est plus bas que le centre de pression, et la condition de stabilité se trouve remplie. D'après les observations curieuses de M. Biot, le gaz de la vessie natatoire n'est pas de l'air atmosphérique : il est de l'azote presque pur dans les individus qui vivent près de la surface, et il se compose de près de 0,9 d'oxigène et de 0,1 d'azote dans ceux qui vivent à des profondeurs de 1000 à 1200 mètres. A 8 ou 9000 mètres de profondeur,

ces gaz seraient aussi denses que l'eau, et les vessies natatoires deviendraient inutiles pour l'équilibre.

Il paraît que les poissons se servent aussi de leur vessie natatoire pour exécuter des mouvemens de haut en bas ou de bas en haut, qu'ils n'exécuteraient que difficilement au moyen de leurs nageoires. Il suffit pour cela qu'ils puissent la resserrer ou la gonfler à volonté : dans le premier cas, leur poids restant le même et leur volume devenant moindre, ils sont plus denses que l'eau, et ils tombent; au contraire, dans le second cas, ils montent comme du liége.

Cependant ce phénomène n'est pas aussi simple qu'on l'imagine au premier instant. Un poisson au milieu de l'eau ne peut pas se gonfler comme un mammifère qui retient son haleine; il ne trouve pas de l'air à prendre on à rejeter ; c'est avec la même quantité de gaz qu'il doit opérer ces mouvemens. Il faut donc que, par une action volontaire, le gaz soit sans cesse plus comprimé qu'il ne le serait par le fluide environnant, et qu'un peu plus ou un peu moins d'énergie dans cette action comprimante lui donne successivement un moindre ou un plus grand volume. Cet effet est rendu sensible par l'appareil de la *figure* 121, qui s'appelle un *ludion*. Le ludion *l* monte ou descend, suivant que l'on soulève ou que l'on presse la membrane *ab*, qui ferme le vase.

Dans les poissons que l'on pêche à une profondeur de mille mètres, le gaz de la vessie natatoire est sous une pression d'eau équivalente à cent atmosphères ; arrivé à la surface, il tend à prendre un volume cent fois plus grand; aussi observe-t-on que tout l'effort musculaire ne suffit plus pour le retenir; il s'échappe en refoulant tous les organes voisins, et surtout la membrane de l'estomac qui est alors tellement tendue et dilatée, qu'elle vient former au dehors de la gueule une espèce de ballon fort singulier. On peut juger par là que les régions de la mer ont leurs peuples différens, non seulement suivant les climats, mais encore suivant les profondeurs.

87 *bis*. *Conditions d'équilibre des corps flottans*. — Il y a deux conditions d'équilibre pour les corps flottans comme pour les corps plongés, et ces conditions sont les mêmes ; seulement la condition de stabilité est différente. Un vaisseau, par exemple, qui pèse un million de kilogrammes, n'est en équilibre que quand il déplace mille mètres cubes d'eau, qui pèsent comme lui un million de kilogrammes, et quand son centre de gravité et le centre de pression de l'eau se trouvent dans la même verticale. Mais, pour la stabilité, il n'est point nécessaire que le centre de gravité se trouve au-dessous du centre de pression; il suffit seulement qu'il se trouve au-dessous d'un autre point que l'on appelle le *métacentre*, et dont la détermination nous entraînerait un peu trop loin. La position du métacentre dépend de la forme du vaisseau; celle du centre de gravité dépend de la distribution de la charge, et c'est de leur distance relative que dépend la rapidité des oscillations. C'est pour cette raison, et pour beaucoup d'autres encore, que, dans le chargement des vaisseaux, il y a un art particulier à distribuer convenablement les poids.

88. *Des aérostats*. — Le principe d'Archimède est vrai pour les gaz comme pour les liquides. Les corps plongés dans les gaz y perdent une partie de leur poids égale au poids du volume de gaz qu'ils déplacent. Si l'air atmosphérique était très-pesant, s'il pesait, par exemple, deux ou trois fois autant que l'eau, la plupart des corps terrestres seraient soulevés par la poussée de ce fluide ; et, nous-mêmes, nous serions emportés dans l'air comme le liége est emporté dans l'eau. Mais l'air est si léger, il fait perdre aux corps si peu de leur poids, qu'il fallait une grande hardiesse de génie pour concevoir la possibilité de s'élever dans l'atmosphère, de s'y soutenir en équilibre, et d'y voguer librement comme on vogue sur la mer.

C'est aux frères Montgolfier que nous devons cette merveilleuse découverte. Ils avaient annoncé qu'une grande ma-

chine de leur invention serait capable de parcourir l'atmosphère : l'expérience en fut tentée à Annonay le 5 juin 1783, en présence des états-généraux et d'un concours immense de peuple ; c'est alors que l'on vit en effet un spectacle nouveau sur la terre, et bien digne d'exciter l'enthousiasme : un globe immense qui s'élevait majestueusement dans les airs, et qui semblait s'y soutenir par quelque puissance invisible. Cette espèce de prodige est cependant bien facile à comprendre. La *montgolfière*, car c'est ainsi qu'on appelle les appareils de cette nature, la montgolfière se compose d'un globe de papier verni ou de taffetas, qui porte à sa partie inférieure une ouverture de quelques pieds carrés. Au-dessous de cette ouverture, et à quelque distance, est suspendu un panier léger, en fil de métal, contenant un corps combustible, soit de la paille hachée, soit de la laine ou du papier. Ce combustible étant enflammé, l'air chaud qu'il produit monte de lui-même, pénètre dans le globe, et en remplit bientôt toute la capacité. A volume égal, l'air chaud pèse moins que l'air froid ; ainsi le poids du globe est moindre que le poids de l'air qu'il déplace, et il doit s'élever, par l'excès d'énergie de la poussée du fluide : il s'élève, emportant avec lui le combustible enflammé qui produit sa puissance ascensionnelle, et, pour qu'il s'arrête, il faut qu'il arrive dans des couches d'air assez raréfiées pour que la différence des poids de l'air froid déplacé et de l'air chaud intérieur soit justement égale au poids de l'enveloppe, du panier, et du combustible qu'il contient.

Un physicien célèbre, Charles, jeune alors, et professeur à Paris, eut l'heureuse idée de remplacer l'air chaud par le gaz inflammable, que l'on appelle aujourd'hui *l'hydrogène*, dont Cavendish avait fait connaître l'extrême légèreté dès l'année 1766. L'hydrogène est plus de quatorze fois plus léger que l'air, car sa densité est 0,0688, en prenant celle de l'air pour unité. Un centimètre cube d'air pèse $0^{k},001299075$, et $1000^{m.c.}$ pèsent $1299^{k},075$, tandis que $1000^{m.c.}$ d'hy-

drogène ne pèsent que 89k,760. La différence est 1209,699. Ainsi un globe de mille mètres cubes, rempli d'hydrogène, peut enlever un poids de 1209k,699. Un globe de 500 mètres cubes ne pourrait enlever que 604k,849. C'est un *ballon* de cette grandeur que Charles fit construire ; et, pour montrer la confiance que devait inspirer sa découverte, il entreprit, avec Robert, ce fameux voyage dans lequel il fut porté en quelques minutes à la hauteur de quatre ou cinq cents toises, et parcourut, dans cette région de l'atmosphère, plus de neuf lieues dans l'espace de deux heures. C'est du milieu des Tuileries que Charles fit son ascension ; toute la population de Paris était en mouvement ; les places publiques, les sommets des édifices, et tous les lieux élevés étaient couverts de spectateurs : un coup de canon fut le signal du départ, et bientôt on vit monter le ballon, comme un météore qui s'élève sur l'horizon ; au plus haut des airs, on distinguait encore les banderolles flottantes, éclairées par le soleil, et les navigateurs tranquilles qui saluaient la terre. Jamais une expérience de physique n'excita tant d'admiration et un tel concert d'applaudissemens.

Charles ne pouvait manquer d'avoir des imitateurs, et il en eut en effet dans tous les pays savans. Mais entre tous les voyages aérostatiques qui furent entrepris pour des recherches scientifiques, on distingue ceux qui furent exécutés en France, en 1804, par MM. Gay-Lussac et Biot. Dans une première ascension, ces deux physiciens, parvenus à la hauteur de 4000 mètres, firent des expériences importantes sur l'état électrique et sur la température de ces hautes régions. Dans une seconde ascension, M. Gay-Lussac, seul, s'éleva à la hauteur de 7000 mètres, la plus grande à laquelle l'homme soit jamais parvenu. MM. de Humboldt et Bompland se sont élevés à 6100 mètres sur le Chimboraço au-dessus du volcan de Cotopaxi. A cette grande hauteur on éprouve un froid très-vif, le thermomètre de M. Gay-Lussac descendit à 10° au-dessous de glace, tandis qu'à la

surface de la terre il marquait 30°. La sécheresse de l'air est si grande, et les corps hygrométriques perdent si rapidement leur humidité qu'on les voit se distordre et se tourmenter dans tous les sens. Le ciel paraît d'un bleu très-foncé et mêlé d'une teinte noire. Suspendu au milieu de ces espaces, dans un air si raréfié, à une si grande distance de la terre et de tous les corps résistans, aucun bruit ne vient frapper l'oreille, aucun objet ne se présente à la vue, et l'on éprouve alors un sentiment de solitude que M. Gay-Lussac seul peut décrire. Après une navigation de six heures, dans laquelle il avait parcouru plus de trente lieues en ligne horizontale, M. Gay-Lussac descendit lentement et vint retrouver la terre dans les environs de Rouen. Nous citerons en leur lieu les résultats dont il a enrichi la science par ce mémorable voyage.

CHAPITRE VIII.

Principes d'Hydrodynamique.

89. L'hydrodynamique, considérée d'une manière générale, embrasse tout ce qui est relatif au mouvement des fluides, et forme parconséquent l'une des branches les plus importantes de la mécanique rationnelle. Mais, dans quelques cas particuliers, les mouvemens des liquides sont soumis à des lois assez simples pour être directement vérifiés par l'expérience, et c'est sous le point de vue purement expérimental que nous allons indiquer les principes de l'hydrodynamique et la construction de quelques machines qui en dépendent.

90. *Condition de l'écoulement des liquides, et théorème de Torricelli.* — Les parois des vases qui contiennent des liquides supportent, généralement, deux pressions opposées (*fig.* 130): l'une, qui s'exerce de dedans en dehors, et qui repousse la paroi ; l'autre, qui s'exerce de dehors en dedans, et qui tend à l'enfoncer. La première est la somme des pressions dues à la colonne liquide qui s'élève au-dessus du point de la paroi que l'on considère, et au poids que cette colonne elle-même peut supporter à son sommet ; la seconde est la pression atmosphérique, ou, plus généralement, la pression du milieu qui enveloppe le vase. Lorsqu'on perce une ouverture, soit dans le fond, soit dans la paroi latérale, le liquide contenu dans cette ouverture supporte la même pression que la paroi dont il tient la place ; par conséquent, la seule condition nécessaire pour qu'il s'écoule, c'est que la pression intérieure, qui tend à produire l'écoulement, soit

plus grande que la pression extérieure qui tend à l'empêcher. Cette vérité peut, au reste, se démontrer par l'expérience suivante. Une éprouvette (*figure* 126) étant remplie d'eau, on en recouvre l'ouverture avec un disque de papier, on la retourne, et la colonne liquide reste suspendue, parce que la pression de haut en bas, qui est due au poids du liquide, est moindre que la pression de bas en haut qui est due à l'atmosphère. Si l'ouverture de l'éprouvette n'avait que deux ou trois millimètres de diamètre, le disque de papier ne serait point nécessaire : mais, pour des ouvertures plus grandes, le disque de papier empêche que la colonne ne se *divise*, c'est-à-dire que l'eau coule d'un côté, tandis que l'air monte de l'autre.

Lorsque le liquide s'écoule d'un orifice en vertu de l'excès de pression dont nous venons de parler, la *dépense*, c'est-à-dire, le volume qui s'échappe dans un temps donné, dépend évidemment de la section de l'orifice et de la vitesse dont les molécules liquides sont animées au moment où elles la traversent. Cette vitesse dépend à son tour de la densité du liquide, de l'excès de pression qui s'exerce à l'orifice, et du frottement que le liquide peut éprouver, soit contre les parois du vase, soit contre les bords de l'orifice. Pour diminuer le frottement qui n'est ici qu'une force perturbatrice, on cherche d'abord les lois de l'écoulement par des orifices en *minces parois*, c'est-à-dire, par des orifices percés dans des plaques très-minces, et ajustés à des vases de grande dimension, afin que le liquide n'ait qu'une très-petite vitesse contre les parois du vase lui-même.

Sous ces conditions, les lois de l'écoulement sont comprises dans le théorème suivant, qui est connu sous le nom de théorème de Torricelli : *Les molécules, en sortant de l'orifice, ont la même vitesse que si elles étaient tombées librement dans le vide, d'une hauteur égale à la hauteur du niveau, au-dessus du centre de l'orifice*. Nous verrons, dans un instant, comment l'expérience peut vérifier cette loi fondamentale, et

comment elle peut vérifier aussi les trois conséquences suivantes qui s'en déduisent.

Premièrement. *La vitesse d'écoulement ne dépend que de la profondeur de l'orifice au-dessus du niveau, et nullement de la nature du liquide :* car tous les corps, en tombant de la même hauteur dans le vide, acquièrent la même vitesse. Ainsi, le mercure et l'eau prennent la même vitesse lorsqu'ils s'écoulent par des orifices qui sont à la même profondeur au-dessous du niveau. Cependant le mercure est poussé par une pression bien plus grande que l'eau. La profondeur de l'orifice étant, par exemple, de 32 pieds, l'eau ne serait poussée que par la pression d'une atmosphère, tandis que le mercure serait poussé par une pression de 13 atmosphères et demie.

Secondement. *Pour un même liquide, les vitesses d'écoulement sont comme les racines carrées des profondeurs des orifices au-dessous du niveau :* car les vitesses des corps pesans sont entre elles comme les racines carrées des hauteurs d'où ils sont tombés. Ainsi, dans un vase qui aurait, par exemple, 100 pieds de hauteur, si l'on perçait deux orifices, l'un à 1 pied de profondeur, et l'autre sur le fond à 100 pieds de profondeur, la vitesse du liquide sortant par le dernier serait dix fois plus grande seulement que la vitesse du liquide sortant par le premier. Cependant, la seconde pression serait 100 fois plus grande que la première.

Troisièmement. Si la pression qui s'exerce au sommet de la colonne liquide était plus grande que la pression extérieure qui s'oppose à l'écoulement, cet excès de pression serait équivalent au poids d'une colonne de *même* liquide d'une certaine hauteur; et alors la vitesse des molécules qui s'écoulent serait la même que si elles étaient tombées du sommet de cette seconde colonne qu'il faut concevoir comme ajoutée au-dessus de la première. Ce serait le contraire si la pression extérieure était plus grande que la pression qui s'exerce au-dessus du liquide.

91. *Divers moyens d'obtenir une pression constante.* Pour vérifier les lois précédentes d'une manière simple et rigoureuse, il est nécessaire d'obtenir une vitesse constante à l'orifice, et par conséquent de maintenir une pression constante sur le liquide qui s'écoule. On y parvient de plusieurs manières, mais nous indiquerons seulement les trois procédés suivans : le *trop-plein*, le *flotteur de M. de Prony*, et le *vase de Mariotte*.

Trop-plein (*fig.* 127) *r* est un réservoir alimentaire, *s* une soupape, *t* un tube, *v* le vase dans lequel se fait l'écoulement, *o* l'orifice, *c* une caisse percée de petits trous, et *d'* un déversoir. Par la soupape *s*, qui se lève plus ou moins, on fait arriver dans le vase *v* un peu plus d'eau qu'il ne s'en écoule par l'orifice *o*; le déversoir *d* sert à évacuer l'excédent; le tube *t* et sa caisse *c* sont destinés à empêcher l'agitation que pourrait produire l'eau par sa chute; car les plus légers mouvemens, même à la surface supérieure, peuvent avoir une influence sur la vitesse à l'orifice.

Flotteur de M. de Prony (*fig.* 132). Cet appareil se compose d'un vase d'écoulement *v*, d'une caisse flottante *c*, d'une caisse inférieure *c'*, de diverses tringles *t* qui réunissent les deux caisses, et d'un entonnoir *n* destiné à conduire dans la caisse inférieure tout le liquide qui s'échappe de l'orifice *o*. Si l'on prend dans le vase *v*, par exemple, dix litres d'eau, et qu'on les verse dans la caisse *c*, le niveau ne sera pas changé dans le vase *v*, car la caisse, étant devenue plus pesante de 10 kilogrammes, déplace, de plus, 10 litres d'eau dans le vase *v*. Ainsi l'addition de l'eau dans la caisse fait remonter le niveau autant que la soustraction de l'eau dans le vase le fait baisser : mais, si l'on ajoute l'eau dans la caisse *c*, on obtiendra le même résultat, puisqu'on produira une même augmentation de poids dans le système ; donc, pour obtenir un niveau constant pendant l'écoulement, il suffit d'ajouter au-devant de l'orifice *o* un entonnoir *n* qui amène dans la caisse *c* tout le liquide qui s'écoule par l'orifice *o*.

Vase de Mariotte. Cet appareil est représenté (*fig.* 133 et 134). *t* est un tube qui peut glisser dans le bouchon de la tubulure *b* et dont l'extrémité inférieure est successivement ou abaissée au point *p*, au-dessous du niveau *nv* de l'ouverture latérale, ou relevée au point *h*, au-dessus du même niveau ; l'ouverture latérale est assez étroite pour que la colonne liquide ne puisse pas se diviser. Le tube étant en *p* (*fig.* 133), et complètement rempli d'eau ainsi que le flacon, il est clair que le liquide doit s'écouler par l'orifice latéral *v*, car la pression intérieure se compose de la pression atmosphérique qui s'exerce au sommet du tube et de la pression due au poids de la colonne liquide *sn*, tandis que la pression extérieure n'est que la pression atmosphérique. Le liquide jaillit en effet, et le niveau tombe rapidement dans l'intérieur du tube depuis le point *s* au point *n* ; là, il s'arrête, et tout écoulement cesse. Le vase reste plein, l'orifice *v* reste ouvert, et cependant pas une goutte de liquide ne s'échappe. Sur toute l'étendue de la couche horizontale *n' nv*, la pression étant la même qu'au point *n*, c'est-à-dire une pression atmosphérique, il n'y a plus de raison pour que le liquide s'écoule. Sur une autre couche, telle que *c' c*, la pression n'est pas due seulement au poids de la colonne supérieure, mais elle est égale à une pression atmosphérique diminuée de la colonne *c' n'*. Que l'on fasse maintenant glisser le tube pour le remonter jusqu'au point *h*, à l'instant même l'écoulement recommence, des bulles d'air se forment à l'extrémité inférieure du tube, se gonflent, se détachent et montent à la file dans la partie supérieure du vase. L'écoulement continue de la sorte, avec une *vitesse constante*, pendant tout le temps que le niveau du liquide descend depuis le sommet du vase jusqu'en *h*; car la pression sur la couche *n' nv* se compose alors de la pression atmosphérique qui s'exerce en *h* et de la pression qui est due au poids de la colonne *hn*, pressions qui restent l'une et l'autre constantes aussi long-temps que le niveau n'est pas tombé jusqu'en *h* : à partir de cet

instant, la vitesse d'écoulement diminue de plus en plus, jusqu'à devenir tout-à-fait nulle, quand le niveau est arrivé au point n. Le vase de Mariotte peut être présenté sous une grande variété de formes, soit avec un orifice latéral pour l'écoulement, soit avec un orifice horizontal, comme l'indique la *fig.* 134.

92. *Vérification expérimentale du théorème de Torricelli.* — La vitesse v des molécules qui sont tombées librement dans le vide, d'une hauteur h, est exprimée par la formule

$$v = \sqrt{2gh}$$

qui se déduit des formules générales du mouvement des corps pesans (40). Nous avons vu d'ailleurs (50) qu'à Paris on a $g = 9^{m},8088$. Ainsi

$$v = 4^{m},429\sqrt{h}.$$

Telle est donc, suivant le théorème de Torricelli, la vitesse que doivent prendre les molécules liquides au moment où elles traversent un orifice dont le centre est situé à une profondeur h au-dessous du niveau, h étant exprimé en mètres. C'est ce que l'on appelle la *vitesse théorique*. Pour vérifier ce résultat, il suffit donc de disposer un appareil à niveau constant, d'où le liquide s'écoule par un orifice en mince paroi d'une section connue s, et dont le centre soit à une profondeur connue h au-dessous du niveau, puis d'observer la dépense ou le nombre des litres qui s'écoulent dans un temps déterminé, par exemple dans 8′ ou 10′. Alors il est facile d'en déduire la dépense d en 1″, exprimée en mètres cubes; cette dépense, ou plutôt ce volume, peut être considéré comme un cylindre qui est passé par l'orifice à-peu-près comme un fil passe à la filière; en désignant donc par v' la longueur inconnue de ce cylindre, on doit avoir

$$sv' = d \text{ ou } v' = \frac{d}{s},$$

la section s de l'orifice étant aussi exprimée en mètres carrés ; et il est évident que v' représente la *vitesse effective* des molécules liquides, puisqu'il représente le nombre des mètres que ces molécules parcourent réellement en 1″.

Il est donc facile de voir si la vitesse effective donnée par la formule

$$v' = \frac{d}{s}$$

est égale à la vitesse théorique donnée par la formule

$$v = 4^{m},\ 429\sqrt{h}.$$

Des expériences comparatives sur ce sujet ont été faites par un très-grand nombre d'observateurs, et tous les résultats conduisent à cette conséquence, qu'à l'orifice même la vitesse effective est seulement les deux tiers environ de la vitesse théorique. Ainsi le théorème de Torricelli, fondé d'ailleurs sur des considérations mécaniques très-simples, semblerait au premier abord n'être pas confirmé par l'expérience. Mais l'on parvient cependant à concilier les résultats : il suffit pour cela de tenir compte de la *contraction de la veine fluide*. On observe en effet que la veine se contracte à partir du moment où elle sort de l'orifice, c'est-à-dire que sa section diminue rapidement; si bien qu'à une distance égale à-peu-près au diamètre de l'orifice, sa section n'est plus que les deux tiers environ de la section de l'orifice lui-même. On a cru long-temps qu'au-delà de cette limite la veine reprenait une section plus grande, et qu'elle avait par conséquent un *maximum de contraction ;* mais M. Savart a démontré dernièrement (*Ann. de Phy. et de Chi.*, t. 53, p. 337) qu'il n'y a de maximum de contraction que pour les veines qui sont lancées de bas en haut, et que dans tous les autres cas la section de la veine va toujours en diminuant depuis l'orifice jusqu'à l'instant où elle se trouble et se divise, comme

nous le verrons tout-à-l'heure ; seulement la contraction, qui est d'abord très-rapide , devient très-faible à partir d'une distance égale à-peu-près au diamètre de l'orifice.

Si donc, au lieu de considérer la vitesse des molécules fluides dans l'orifice lui-même, on la considère dans la section de la veine qui se trouve à une petite distance, au point où la rapide contraction s'est accomplie, il est évident qu'elle est d'autant plus grande que la section est plus petite, ou, en d'autres termes, que les vitesses sont en raison inverse des sections, car c'est la même quantité de liquide qui passe dans le même temps. Pour la section dont il s'agit, la vitesse effective est par conséquent égale à la vitesse théorique.

Le théorème de Torricelli une fois démontré, il est facile de voir comment il faut disposer les appareils pour démontrer les trois conséquences que nous en avons tirées, et pour faire voir que aussi le jet prend une *courbure parabolique* lorsqu'il s'échappe d'une ouverture latérale sous diverses inclinaisons.

93. *Constitution de la veine fluide.* On avait remarqué depuis bien long-temps qu'une veine fluide se compose toujours de deux parties distinctes : l'une voisine de l'orifice, qui est calme, transparente et semblable à une tige de cristal ; l'autre plus éloignée, qui est trouble et comme composée de gouttes discontinues ; mais l'on doit à M. Savart une analyse complète et extrêmement remarquable de la vraie constitution de la veine et des diverses apparences qu'elle présente. Nous regrettons de ne pouvoir donner ici qu'un résumé très-succint de ses belles observations.

La figure 142 représente une veine fluide lancée de haut en bas, telle qu'elle paraît être lorsqu'on la regarde ; *an* est la partie fixe, *nvv'* est le commencement de la partie trouble qui semble se composer de ventres et de nœuds alternatifs. La figure 143 représente la veine fluide précédente , telle qu'elle est en réalité : toute la partie trouble est composée de gouttes distinctes et séparées l'une de l'autre ; les ventres

étant formés par de larges gouttes aplaties horizontalement, tandis que les nœuds sont formés de gouttes alongées dans le sens vertical. Comme il arrive d'ailleurs que les ventres et les nœuds occupent des positions fixes, il faut nécessairement que la même goutte *a*, qui est aplatie dans les ventres, soit alongée lorsqu'elle arrive au point où paraît le premier nœud *n'*; qu'elle soit de nouveau aplatie au deuxième ventre, allongée au deuxième nœud, etc.; il faut par conséquent qu'elle éprouve des vibrations périodiques parfaitement régulières qui la fassent passer de l'une à l'autre de ces formes. Toutes les gouttes paraissent avoir le même diamètre et éprouver les mêmes changemens; il paraît toutefois qu'entre deux gouttes consécutives il existe une autre goutte beaucoup plus petite, qui, par un effet de la vision, donne aux ventres l'apparence tubulaire que l'on observe.

M. Savart a pareillement constaté que chaque goutte est produite par un renflement annulaire qui prend naissance très-près de l'orifice, et qui se propage sur la partie limpide de la veine, en augmentant de volume jusqu'au moment où il s'en détache; qu'il y a, par conséquent, à l'orifice même, une succession périodique de pulsations, et que leur nombre est en raison directe de la vitesse d'écoulement et en raison inverse du diamètre de l'orifice.

Les pulsations dont il s'agit sont assez rapides et assez régulières pour donner naissance à un son bien caractérisé, et si, avec un timbre ou un instrument de musique, on produit à quelque distance le même son ou un son voisin, on observe une modification remarquable dans la veine, même quand elle est lancée de bas en haut (*fig.* 136 et 137): les ventres et les nœuds prennent plus de régularité, et ils envahissent la partie transparente qui se réduit presque à rien; cependant la dépense reste constante.

La présence de l'air n'a aucune influence sur la forme et les dimensions des veines, non plus que sur le nombre des pulsations.

Ces résultats s'appliquent aux jets lancés horizontalement ou obliquement de bas en haut, pourvu que l'inclinaison ne dépasse pas 45°; car, à cette limite, la veine commence à avoir un maximum de contraction qui est de plus en plus marqué à mesure que le jet approche d'être vertical.

Quand les orifices ne sont pas circulaires, la veine présente des changemens de forme très-remarquables qui ont été particulièrement étudiés par MM. Poncelet et Lesbros. Par exemple, pour un orifice carré, de 20 centimètres de côté, les sections de la veine faites aux distances de 20, 30 et 40 centimètres sont représentées dans la figure 139 : le n° 1 est l'orifice, et les n°s 2, 3 et 4 sont les sections à 20, 30 et 40 centimètres de l'orifice. La paroi étant verticale, la direction primitive de la veine était horizontale. Le point *h* désigne partout sa partie supérieure; il est facile de saisir les formes intermédiaires et de se représenter le relief singulier de cette veine parabolique.

94. *Des ajutages, et de leur influence sur l'écoulement.* — On appelle *ajutages* des tuyaux de diverses formes, ou des plaques courbes, percées de diverses manières, qui s'ajustent aux orifices en minces parois pour donner passage au liquide qui s'écoule.

Le plus simple des ajutages est celui qui a la forme exacte que prend la veine depuis l'orifice jusqu'à la section contractée. Lorsqu'il est travaillé avec soin, et que sa surface intérieure est bien polie, il n'exerce aucune influence sur la dépense.

Une paroi courbe, percée d'un orifice, ne donne pas la même dépense qu'une paroi plane, percée d'un orifice de même grandeur : elle donne une dépense plus grande quand sa concavité est tournée vers l'intérieur (*fig.* 140), et une dépense moindre quand elle est tournée vers l'extérieur (*fig.* 141).

Dans les *ajutages cylindriques* de même diamètre que les orifices en minces parois auxquels ils sont appliqués, il se

produit un phénomène singulier : tantôt la veine fluide reste *libre* et passe dans l'ajutage sans le toucher, tantôt elle devient *adhérente*, et l'écoulement se fait à *gueule-bée*, c'est-à-dire à plein tuyau. Dans le premier cas, la présence de l'ajutage n'a d'influence ni sur la vitesse ni sur la dépense; il ne peut produire aucun effet, puisqu'il n'a aucun point de contact avec le liquide. Dans le second cas, l'adhérence qui s'établit entre la surface de la veine et les parois de l'ajutage détermine une augmentation de vitesse et une augmentation de dépense. La dépense du premier cas est à celle du second comme 100 est à 133, pourvu toutefois que le diamètre de l'ajutage soit à-peu-près le quart de sa longueur. Ce phénomène dépend de plusieurs causes, et surtout de la pression : sous de faibles charges, la veine est toujours adhérente, même pour les ajutages très-courts; sous de grandes pressions, la veine reste libre; et, sous des pressions intermédiaires, on peut à volonté produire l'écoulement à veine libre ou à veine adhérente : il suffit d'un léger obstacle pour établir l'adhérence, et il suffit quelquefois du moindre choc pour que la veine se détache des parois de l'ajutage et coule librement.

Quand l'adhérence est établie, la veine fluide se contracte dans l'ajutage près de la paroi, comme elle ferait à l'air libre (*fig.* 128); on peut s'en assurer en faisant l'expérience avec un tube de verre, et l'on peut s'en assurer encore en donnant à l'ajutage la forme elle-même de la veine contractée (*fig.* 129): avec ce rétrécissement, la dépense est encore 133, comme elle était auparavant.

Un *ajutage conique* peut donner une dépense encore plus grande que l'ajutage cylindrique.

S'il y a des ajutages qui augmentent la dépense, il est très-facile d'en construire aussi qui la diminuent dans un très-grand rapport. Tout renflement dans un ajutage conique ou cylindrique produit une diminution de vitesse; les *réflexions*, les *remous*, les chocs des molécules animées de

mouvemens contraires, produisent une grande complication de phénomènes, et en dernier résultat une grande diminution dans la dépense.

Dans des tubes très-fins, les liquides cessent de s'écouler, même sous des pressions quelquefois considérables : ainsi, le mercure cesse de s'écouler, sous une pression de 9^{mm}, dans un tube de 357 millimètres de longueur et de 1^{mm} 12 de diamètre.

95. *De l'unité de mesure dans la distribution des eaux.* — L'unité de mesure, pour les eaux courantes, est connue sous le nom de *pouce de fontainier* ou *pouce d'eau.* C'est la quantité d'eau qui coule, en une minute, par un orifice circulaire d'un pouce de diamètre, percé dans une paroi verticale, avec une charge d'eau de sept lignes sur le centre de l'orifice, ou d'une ligne au-dessus de son point culminant. Le volume d'eau qui s'écoule dans de telles circonstances est de 14 pintes anciennes de Paris, ou 672 pouces cubes par minute ; ce qui revient à 19, 2 $^{mèt.\ cub.}$ en 24 heures. Un demi-pouce d'eau est la quantité d'eau qui s'écoule par un orifice d'un demi-pouce de diamètre, dont le centre supporte également une pression de 7 lignes : d'où il résulte, qu'en volume ou en poids, le demi-pouce est véritablement le quart du pouce ; car, sous la même pression, un orifice d'un diamètre moitié donne une dépense qui n'est que le quart. Une *ligne d'eau* n'est, par la même raison, que la 144e partie du pouce, ou $\frac{19,2}{144}$ $^{m.\ c.}$ en 24 heures.

Il paraît qu'à Paris la dépense journalière est d'environ 10,000 mètres cubes ; ce qui fait environ 15 litres par tête.

96. *Des pressions latérales qu'exercent les liquides en mouvement.* — Un liquide qui coule dans des ajutages ou des tuyaux exerce toujours contre leurs parois une moindre pression que s'il était en repos. Daniel Bernouilli exprime cette pression qui a lieu pendant le mouvement par $h-h'$.

Pour comprendre cette formule, considérons la vitesse effective qui anime les molécules liquides dans la section

perpendiculaire à l'axe du tuyau ou de l'ajutage pour laquelle on veut calculer la pression : cette vitesse est due, par le théorème de Torricelli, à une certaine hauteur de niveau qui est la valeur de h'. Concevons ensuite que le tuyau soit coupé suivant cette même section, de telle sorte qu'elle reste ouverte et devienne elle-même l'orifice d'écoulement ; alors le liquide prendrait une certaine vitesse, et la valeur de h désigne la hauteur de la colonne liquide qui serait capable de la produire. Cette valeur de h n'est pas nécessairement égale à la hauteur réelle du niveau au-dessus du centre de la section ; elle peut être un peu plus petite par l'effet de la contraction, ou un peu plus grande par l'influence des ajutages. Si h' se trouve égale à h, la pression est nulle et les parois ne supportent absolument aucun effort. Si h' est plus grand que h, la pression est négative, c'est-à-dire qu'au lieu d'une pression sur la paroi du tuyau, il s'exerce une véritable *succion*.

Les expériences par lesquelles on a vérifié jusqu'à présent la formule de Bernouilli ne sont ni assez nombreuses ni assez précises pour qu'on puisse l'employer avec une entière confiance. Cependant le phénomène de succion qu'elle indique est un fait remarquable sur lequel il ne peut rester aucun doute; il fut constaté par Bernouilli lui-même, et depuis il a été étudié plus particulièrement par Venturi et par M. Hachette.

Voici les circonstances dans lesquelles il se produit.

Nous avons vu que, par un ajutage cylindrique, quand la veine est adhérente, la dépense est plus grande que par un orifice en mince paroi de même diamètre; donc, la vitesse effective est plus grande que la vitesse théorique, et par conséquent h' est plus grand que h; ce qui doit produire le phénomène de la succion.

En effet, si l'on perce l'ajutage d'une petite ouverture latérale pour y mettre un tube recourbé tel que xy (*fig.* 127), le liquide monte dans l'intérieur de ce tube, et la hauteur

de la colonne soulevée donne la mesure de la force d'aspiration. La dépense étant plus grande encore par l'ajutage à double cône, l'aspiration doit être encore plus grande; c'est ce qui est complètement vérifié par les expériences de Venturi.

97. *De la réaction qui est produite par l'écoulement des fluides.* — Concevons un vase de forme cubique, porté sur des roulettes très-mobiles, et posé sur un plan horizontal qui offre peu de frottement. Le vase rempli de liquide restera en repos, parce que toutes les pressions latérales sont égales et contraires. Mais si l'on perce la paroi pour que le liquide jaillisse latéralement, le vase sera repoussé en sens contraires, il y aura un recul semblable au recul des armes à feu ou des fusils à vent (30). Cette réaction est rendue sensible par un appareil que l'on appelle le *tourniquet hydraulique* (*fig.* 134 *bis*). Il se compose d'un réservoir *v* mobile autour d'un axe vertical, portant à sa partie supérieure un robinet *r* qu'il suffit d'ouvrir pour mettre l'appareil en mouvement. En effet, les jets sortant alors par les tubes horizontaux et recourbés *t*,*t'*, et se trouvant dirigés tangentiellement au cercle décrit par l'extrémité de ces tubes, leur réaction forme un couple qui imprime à l'appareil un mouvement de rotation très-rapide.

On a cru long-temps, sur l'autorité de Newton, que le recul de cette espèce était égal au poids d'une colonne liquide ayant pour base la section contractée de la veine qui s'écoule, et pour hauteur la hauteur du niveau. Mais Daniel Bernouilli a démontré que, dans tous les cas d'écoulement, la force de réaction est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base la section contractée de la veine qui s'écoule, et pour hauteur *le double* de la hauteur du niveau. C'est sur ce principe qu'est fondée la roue hydraulique connue sous le nom de *turbine*, dont on se sert avec de grands avantages depuis les derniers perfectionnemens que M. Fourneyron est parvenu à lui donner.

98. *Jets-d'eau.* — Il y a des jets-d'eau qui s'élèvent verticalement de bas en haut, e t il en a d'autres qui s'élèvent en gerbes suivant des paraboles de diverses amplitudes. Les orifices qui donnent naissance aux jets verticaux sont percés dans des parois horizontales, et ceux qui donnent naissance aux jets paraboliques sont percés dans des parois diversement inclinées. Dans tous les cas, la direction du jet est produite par la pesanteur, qui est toujours verticale, et par la pression ou la force impulsive, qui est toujours perpendiculaire à la paroi. D'après le théorème de Torricelli, les molécules liquides ayant à l'orifice la même vitesse que si elles fussent tombées d'une hauteur égale à la hauteur du niveau du liquide dans le réservoir, on voit que cette vitesse, dirigée de bas en haut, serait précisément capable de faire remonter toutes les molécules jusqu'à la hauteur de ce niveau d'où elles sont censées descendues. Ainsi, la hauteur du jet vertical serait toujours égale à l'élévation du niveau au-dessus de l'orifice. Mais il y a plusieurs causes qui empêchent les eaux jaillissantes d'atteindre à cette hauteur théorique : elles éprouvent des frottemens contre les parois des tuyaux qui les amènent depuis le réservoir jusqu'à l'orifice, et contre l'orifice lui-même dont elles rasent les parois avec une grande vitesse ; elles éprouvent la résistance de l'air atmosphérique, et enfin les eaux qui retombent du point le plus élevé du jet retombent sur les eaux ascendantes et leur enlèvent du mouvement. Pour réduire toutes ces résistances à leurs moindres valeurs, on a coutume de suivre dans la pratique les règles suivantes :

1° On donne aux tuyaux de conduite un diamètre qui dépend de leurs longueurs, de la grandeur de l'orifice et de la hauteur du réservoir ; de telle sorte que la vitesse de l'eau dans les tuyaux soit tout au plus de 2 ou 3 décimètres par seconde.

2° On fait l'orifice circulaire et on le perce en *mince paroi* dans une plaque que l'on appelle la *platine* : la platine est

plane ou courbée en forme de calotte convexe, suivant que l'on veut avoir un jet vertical ou une gerbe à plusieurs jets paraboliques.

Tout ajutage, soit cylindrique ou conique, donne un jet moins élevé que les orifices en minces parois.

Ces conditions étant remplies, on admet, d'après les expériences de Mariotte, que le jet s'élève à une hauteur de 5 pieds pour une hauteur de réservoir de 5 pieds 1 pouce; et qu'en général, pour avoir la hauteur du réservoir, il faut, à la hauteur h du jet, évaluée en pieds, ajouter autant de pouces qu'il se trouve d'unités dans $\frac{4}{5}$ élevé au carré. Ainsi un jet de 100 pieds suppose un réservoir de 100 pieds, plus 400 pouces, ou enfin de 133 pieds 4 pouces.

99. *Du choc d'une veine fluide contre un corps solide.* — M. Savart a publié sur ce sujet un grand travail (*Ann. de Phys. et de Chim.* (*t.* 54) dont nous allons extraire les résultats les plus élémentaires.

Concevons un tube de 2 mètres de hauteur, de 1 décimètre de diamètre, disposé verticalement, et muni à sa partie inférieure d'un orifice en mince paroi circulaire et de 10 à 12 millimètres de diamètre; supposons qu'après l'avoir rempli d'eau, on découvre l'orifice, mais qu'au lieu de laisser tomber la veine librement, on la reçoive à 20^{mm} de l'orifice, sur un disque de métal de 27^{mm} de diamètre, dont la surface soit plane et polie, et dont le centre tombe directement sous le centre de l'orifice (*fig.* 144). Alors la veine fluide présente les phénomènes suivans :

1° Elle s'épanouit sur le disque, prend l'apparence d'une nappe à-peu-près conique, dont la partie centrale $a\ b$ est mince, unie et transparente, tandis que la zône extérieure $a\ a'$, bb', n°s 1 et 2, est trouble, sillonnée de stries, les unes circulaires, les autres rayonnantes, qui lancent au pourtour une foule de petits jets ou de petites gouttelettes tombant en pluie. Cette zône est comme *l'auréole* de la nappe transparente, et leur ensemble forme une *nappe auréolée.* Les

nappes de cette espèce éprouvent des pulsations périodiques, c'est-à-dire qu'elles s'élèvent et s'abaissent un peu, et qu'en même temps elles augmentent ou diminuent de diamètre : les pulsations sont assez rapides pour produire un son.

2° La pression diminuant à mesure que le niveau baisse dans le tube, le diamètre total de la nappe augmente, mais l'auréole diminue, de telle sorte que, sous la pression de 60 à 62 centimètres, l'auréole a disparu, et la nappe arrive à la fois à une transparence complète et au maximum de diamètre, n° 3.

3° A partir de ce maximum, le diamètre diminue, et en même temps la nappe se recourbe, s'arrondit, et, sous la pression de 32 à 33 centimètres, elle se ferme entièrement, n° 4 ; son diamètre est alors de 40 à 45 centimètres.

4° La pression diminuant de plus en plus, la nappe reste fermée, mais son diamètre continue à diminuer graduellement, jusqu'à la pression de 10 à 12 centimètres ; à cette époque elle change brusquement d'aspect, elle se relève sur le disque n° 5, puis, un instant après, elle retombe à sa forme première n° 6, se relève de nouveau, et passe ainsi 7 ou 8 fois d'une forme à l'autre, en diminuant de volume jusqu'à ce qu'enfin elle disparaisse entièrement.

Ce phénomène remarquable ne pouvant être étudié que d'une manière passagère, au moyen d'un simple tube où le niveau diminue sans cesse, M. Savart a imaginé l'appareil suivant, pour maintenir une pression donnée aussi longtemps que l'expérience l'exige.

tt' (*fig.* 138) est le tube à l'extrémité inférieure duquel on adapte les ajutages en mince paroi, représentés au-dessous de la figure 138, n°s 2 et 3. Ce tube a $4^m,5$ de hauteur, et 54^{mm} de diamètre ; son extrémité supérieure s'engage dans le fond d'un réservoir où le niveau est maintenu constant, au moyen d'un siphon à robinet qui verse le liquide dans la caisse *c*, et au moyen du déversoir *d* ; un gros ro-

binet r, muni d'une tige et d'une poignée s, sert à modérer convenablement la quantité d'eau que le réservoir donne au tube ; enfin, pour graduer la pression, le tube tt' porte une espèce de manomètre $m\ n\ o\ p\ q$, construit de la manière suivante : les parties $m\ n\ o\ p\ q$ sont de verre, la partie intermédiaire $n\ o$ est de cuivre ; un trou h, qui est percé latéralement au bas de celle-ci, et qui se ferme avec une cheville, sert à établir ou supprimer à volonté la communication avec l'air extérieur; on verse du mercure à-peu-près à moitié de la hauteur dans les deux branches $o\ p$ et $p\ q$. Cela posé, le trou h étant ouvert, le mercure est au même niveau dans les deux branches du manomètre, et la pression atmosphérique s'exerce sur le sommet de la colonne liquide contenue dans le tube tt' et dans la branche $m\ n$, qui communique sans cesse avec lui ; mais, dès que le trou est fermé, il est évident que par l'écoulement qui a lieu au bas du tube tt', le mercure monte dans la branche $o\ p$ et descend dans la branche $p\ q$, et qu'en même temps le niveau de l'eau s'abaisse dans le tube $m\ n$. Soit z la différence des niveaux du mercure dans ces deux branches, et p la pression atmosphérique : l'air intérieur est alors sous une pression exprimée par une colonne de mercure $p—z$, ou par une colonne d'eau $(p—z)\,d$, d étant la densité du mercure, et par conséquent dans l'état de repos, la pression de haut en bas qui s'exerce sur l'orifice surpasse la pression atmosphérique de $h—dz$, h étant la hauteur de l'eau dans le tube tt'. C'est en vertu de cet excès de pression que le liquide s'écoulerait, si le tube tt' était assez large pour que les vitesses y fussent très-petites ; et comme on peut, en ouvrant convenablement le robinet r, maintenir le même excès de pression pendant long-temps, on arrive à produire des phénomènes durables, faciles à observer et à mesurer.

Au moyen de cet appareil, M. Savart a pu constater les résultats suivans pour la température 0°.

1° Les nappes ouvertes et unies se font pour tous les ori-

fices à une pression à-peu-près double de celle qui est nécessaire pour faire les nappes fermées. 2° Les diamètres des nappes fermées sont à-peu-près proportionnels à ceux des orifices. 3° Les nappes se ferment à des pressions d'autant plus grandes, que le diamètre des orifices est plus petit. M. Savart a pareillement découvert qu'à partir de 10 ou 20 millimètres, l'augmentation de distance du disque à l'orifice donne lieu à des phénomènes analogues à ceux d'une augmentation de pression ou réciproquement; que la température du liquide a une telle influence sur le diamètre maximum des nappes, qu'à 1 ou 2° il est beaucoup plut petit qu'à 0, et surtout beaucoup plus petit qu'à 4°; que la nature du liquide a une influence encore plus marquée, comme on le voit sur l'alcool, l'huile, l'éther, le mercure et surtout sur l'eau elle-même, puisque l'addition d'une très-petite quantité d'acide empêche complètement la formation des nappes. M. Savart a pareillement étudié les effets du choc de la veine sur d'autres corps, et particulièrement sur un cylindre de verre de 27 millimètres de diamètre; les figures 148, 149, 150, 151 et 152, représentent les résultats que l'on obtient dans ce cas avec un orifice de trois millimètres, sous une pression de 152 centimètres, suivant que la veine, toujours horizontale et perpendiculaire au cylindre, vient le frapper plus haut ou plus bas : près de chaque figure, on a représenté la coupe du cylindre sur une plus grande échelle et le point d'attaque du jet.

100. *Du choc des deux veines fluides opposées.* C'est encore à M. Savart que l'on doit la connaissance des phénomènes extrêmement intéressans que présente le choc de deux veines fluides opposées (*Ann. de Phy. et de Chi.* t. 55). Dans l'extrait que nous allons faire de ce beau travail, nous pourrons à peine donner une idée des résultats les plus généraux et les plus remarquables qu'il contient. Le principal appareil qui a servi à ces expériences est représenté dans la fig. 135 : il se compose de deux réservoirs cylindriques

a, *a'* de 1^m 37 de hauteur et de 0^m 22 de diamètre, disposés en face l'un de l'autre à la distance de 35 à 40 centimètres : dans les douilles *b*, *b'* s'adaptent les tubes cylindriques *c*, *c'*, à l'extrémité desquels se vissent les orifices ; la garniture en filasse de ces tubes permet de donner aux axes des orifices des directions exactement coïncidentes ou légèrement inclinées vers le haut.

Vases de même diamètre, orifices égaux. Les pressions étant égales, on découvre les orifices qui peuvent avoir de 3 à 6 millimètres de diamètre, et à l'instant où les veines se choquent, une belle nappe plane se forme au milieu de l'espace qui sépare les orifices ; elle est auréolée ou unie, suivant la pression, et elle acquiert son maximum de diamètre sous une pression déterminée, étant alors unie et transparente dans toute son étendue. Les pressions qui donnent le diamètre maximum sont en raison inverse des diamètres des orifices; aussi pour les orifices de 6^{mm} et de 3^{mm}, les pressions sont de 55 à 65 centimètres et de 105 à 120. Au-dessous du maximum, les diamèters sont proportionnels à la pression pour un même orifice, et ils sont proportionnels aux aires des orifices, lorsque les orifices sont différens.

Si la pression est entretenue constante d'un côté, tandis qu'elle peut baisser de l'autre, on observe les phénomènes suivans :

Au moment où l'on découvre les orifices, les pressions étant égales, la nappe se développe au milieu de leur intervalle; mais bientôt cette nappe est poussée contre l'orifice du vase dont le niveau s'est abaissé, elle s'applique contre la paroi et prend alors tous les caractères d'une veine qui choque un plan : c'est-à-dire qu'elle est conique et auréolée sous une forte pression ; courbe, unie et ouverte, sous une pression moindre ; et, enfin, unie et fermée sous les pressions très faibles. On observe en même temps que le vase qui ne reçoit point de liquide est sensiblement au même niveau que l'autre; ainsi, la nappe le ferme hermétiquement et présente

alors ce phénomène singulier d'une colonne en repos qui fait équilibre à une colonne en mouvement de même hauteur. Cette conséquence s'étend même au cas où la veine a une section un peu moindre que celle de la colonne qui est en repos, et elle s'étend encore au cas où le liquide en repos est plus ou moins dense que le liquide en mouvement; seulement il faut alors que les hauteurs des colonnes soient en raison inverse de leurs densités, comme pour l'équilibre statique.

Orifices égaux, vases inégaux. Lorsque les deux vases ont des diamètres différens, l'écoulement libre, c'est-à-dire celui qui se fait sans ajouter de nouveau liquide aux vases, présente des alternatives dont il est facile de se rendre compte : le petit vase se vide alors avec une vitesse périodiquement variable.

Orifices inégaux, vases égaux. Les deux vases communiquant entre eux pour qu'ils soient maintenus exactement au même niveau, on observe que, pour les cas où le diamètre du grand orifice n'est pas plus que triple de celui du petit, la nappe présente les phénomènes indiqués par la figure 145, n° 1, 2 et 3; c'est-à-dire que, si la nappe est conique pour les fortes pressions n° 1, elle devient ensuite unie et courbe n° 2, pour des pressions moindres; enfin elle se ferme tout-à-fait n° 3, pour des pressions encore plus petites.

M. Savart est encore parvenu aux conséquences suivantes par d'autres séries d'expériences sur la pression des veines liquides et sur la rapidité avec laquelle l'équilibre s'établit entre deux vases, l'un plein et l'autre vide, quand c'est une veine liquide qui établit la communication.

1° La vitesse de toutes les molécules qui composent une tranche normale à l'axe d'une veine est exactement la même.

2° La pression exercée par une veine lancée de haut en bas contre un plan qui lui est normal, et dont le diamètre est égal à celui de la veine au point de contact, est mesurée par le poids d'une colonne d'eau dont la hauteur serait égale à la distance comprise entre le plan choqué et le ni-

veau du liquide dans le réservoir, et dont le diamètre serait égal à celui de la veine au point où elle rencontre le plan.

3° La pression exercée par la veine devient égale au triple de cette quantité, lorsqu'elle a lieu sur un plan horizontal dont le diamètre est le même que celui de la nappe mince qui résulte de l'épanouissement du jet ; et elle est seulement égale au double de cette quantité, lorsqu'on retranche de la pression totale le poids propre de la nappe mince.

4° Quand la pression s'exerce sur une surface concave hémisphérique, elle peut devenir égale au quadruple de la colonne liquide qui a pour diamètre le diamètre de la veine au contact du corps choqué, et pour hauteur la distance de ce point à la surface de niveau.

5° Lorsque deux vases de même diamètre, armés d'orifices égaux, sont disposés de manière que la veine lancée par l'un puisse pénétrer au travers de l'orifice de l'autre, si l'un de ces vases est plein et l'autre vide, la charge de liquide se partage également entre les deux, et le temps nécessaire pour que les deux colonnes arrivent à l'égalité de hauteur n'est que les deux tiers de celui qu'il faut pour le même partage, lorsque les vases communiquent directement entre eux par un orifice du même diamètre que celui qui lance la veine. Si le vase qui contient d'abord seul le liquide est entretenu à un niveau constant, le vase qui reçoit la veine arrive aussi à l'égalité de pression dans les deux tiers du temps qui est nécessaire pour que cette égalité s'établisse lorsque les vases communiquent directement entre eux.

101. *Divers appareils pour le mouvement des liquides.*— Comme application des principes précédens et du jeu des pressions atmosphériques, nous essaierons de faire connaître quelques machines usuelles. Nous en avons renvoyé la description à la fin du chapitre, pour ne pas interrompre l'exposition générale.

102. *Du siphon.* — Le siphon est un tube recourbé *bsb'* (*fig.* 153) : *bs* est la *courte branche* ; *sb'* est la *grande bran-*

che ; *at* est le tube d'aspiration, dont nous verrons plus tard l'usage : mais, pour le moment, nous supposerons qu'il n'y soit pas. Les deux branches étant remplies de liquide, la pression est la même au point *b* et au point *n*, qui sont au même niveau ; ainsi, en *b'*, elle est plus grande de tout le poids de la colonne *nb'*. Le liquide s'écoule par la grande branche en vertu de cet excès de pression, et sa vitesse est la même que s'il fût tombé de la hauteur *nb'*.

La même cause fait continuer l'écoulement, tant qu'il y a du liquide en *b*. Si cette extrémité de la courte branche plonge dans un vase, le vase se vide, et la vitesse d'écoulement est toujours produite par la différence de hauteur des deux branches, en prenant pour hauteur de chacune d'elles la distance du sommet *s* au niveau du liquide dans lequel elle plonge. Le tube d'aspiration est destiné à *amorcer* le siphon, c'est-à-dire à le remplir de liquide pour le mettre en activité. Les figures 154 et 155 représentent des siphons d'une autre espèce, dont on devinera facilement les effets ; on les appelle des *vases de Tantale*.

Le siphon n'est pas seulement d'un usage journalier dans les arts, mais il peut encore être employé avec avantage pour détourner le cours d'une rivière.

103. *Fontaine de compression.* — *v* (*fig.* 156) est un vase en cuivre à parois très-solides ; *t* un tube qui fait corps avec le robinet *r* ; ces deux pièces sont soudées, et leur ensemble peut se visser sur le col du vase *v* ; *j* est l'ajutage d'écoulement, il se visse au-dessus du robinet *r* : c'est de la grandeur de son orifice que dépend le diamètre du jet ; *nn'* est le niveau de l'eau dans le vase. Au moyen d'une pompe foulante qui s'adapte à la place de l'ajutage, au-dessus du robinet *r*, on comprime l'air dans l'espace *nan'*. Alors la fontaine est chargée ; on ôte la pompe, on visse l'ajutage, on tourne le robinet, et le liquide jaillit à une grande hauteur : à 30 ou même à 100 pieds, si l'air est comprimé à 2 atmosphères, ou à 5 ou 6 atmosphères.

104. *Fontaine intermittente.* — *r* (*fig.* 157) est le réservoir d'eau, *jj'* sont les ajutages d'écoulement : la figure n'en représente que deux ; *t* est *le tube de pression* : son extrémité supérieure s'élève au-dessus du niveau de l'eau du réservoir ; *p* est le pied de la fontaine, où se trouve le secret des intermittences : on y distingue une échancrure *e* à l'extrémité inférieure du tube, et une ouverture *v* par laquelle l'eau passe du premier fond sur le second. Quand l'échancrure est à nu, l'air passe dans le tube et vient exercer une pression atmosphérique sur la surface *nn'* de l'eau du réservoir ; quand l'échancrure est baignée par l'eau qui s'accumule sur le premier fond, l'air ne peut plus entrer par le tube et, la pression diminuant de plus en plus dans le réservoir, l'écoulement cesse jusqu'à ce que l'échancrure soit dégagée et que l'air puisse de nouveau passer dans le tube.

Ainsi, la durée des intermittences dépend des grandeurs relatives de l'ouverture *v* et des ajutages, de la hauteur de l'échancrure, et de la distance des ajutages au niveau de l'eau du réservoir.

105. *Fontaine de Héron.*—Cet appareil (*fig.* 160) se compose de trois vases : un vase supérieur *a*, un vase moyen *b*, et un vase inférieur *c* ; et de trois tubes : le premier *x* descendant du fond du vase supérieur au fond du vase inférieur, le second *y* s'élevant du sommet du vase inférieur au dessus du vase moyen, et le troisième *z* s'élevant du fond du vase moyen jusqu'à 2 ou 3 décimètres au-dessus du vase supérieur ; c'est celui-ci qui forme le jet de la fontaine de Héron. On met de l'eau dans le vase *b*, au moyen du bouchon *p* que l'on ferme ensuite ; on met pareillement de l'eau dans le vase *a*, on ouvre le robinet *r*, et le liquide s'élance jusqu'à un point qui est autant élevé au-dessus du niveau du vase moyen que le niveau du vase supérieur est lui-même élevé au-dessus du niveau du vase inférieur. Cette pression est en effet celle que supporte l'air qui est enfermé dans le vase inférieur et dans le vase moyen.

La figure 159 représente une autre fontaine de Héron, dont on devinera facilement la disposition : il suffit de quelques tubes de verre pour la construire.

106. *Lampe à gaz hydrogène.* — Cet appareil se compose d'un ballon à long col *b*, renversé dans un vase plus large *v* (*fig.* 158), dont il ne touche pas tout-à-fait le fond ; la jonction *cc'* doit être hermétiquement fermée ; un cylindre creux de zinc *zz'* enveloppe le col du ballon ; l'eau acidulée qui remplit le vase *v* agit sur le zinc, elle se décompose, son hydrogène se dégage, et par la pression croissante qu'il exerce, l'eau est de plus en plus refoulée dans le ballon *b*, jusqu'à ce que le niveau soit descendu au-dessous de la dernière tranche *z'* du zinc ; alors toute action cesse, et l'on a un réservoir rempli d'hydrogène comprimé. En tournant le robinet *r*, le gaz se dégage dans l'air par le tube *t*, qui doit être très-fin, et, mélangé à l'air atmosphérique, il s'enflamme au contact d'une éponge de platine.

107. *Pompe aspirante et élévatoire.* — La pompe aspirante (*fig.* 161) se compose d'un *tuyau d'aspiration a*, d'un *corps de pompe b*, d'un *piston p*, d'un *tuyau d'ascension s*, et de trois *soupapes r*, *t*, *l*, qui s'ouvrent de bas en haut. La première soupape *r* est au fond du corps de pompe, la deuxième *t* est dans l'épaisseur du piston, et la troisième *l* est au bas du tuyau d'ascension. Le tuyau d'aspiration plonge dans l'eau que l'on veut élever, et la tige du piston passe dans une boîte à étoupe *e* et dans une boîte à graisse *g*. A l'origine du mouvement, le piston étant soulevé, sa soupape se ferme, et les deux autres *r* et *l* s'ouvrent, la première par l'air supérieur qui se comprime et s'échappe, la seconde par l'air inférieur qui se dilate et passe sous le piston : la pression diminue dans le tuyau d'aspiration, et l'eau s'y élève par l'effet de la pression extérieure. Arrivé au-dessus de sa course, le piston redescend ; la soupape inférieure se ferme ; l'air se comprime dans le corps de pompe, soulève la soupape du piston, et passe au-dessus. En remontant une

seconde fois, le piston soulève l'eau un peu plus haut, et en redescendant une seconde fois il chasse une nouvelle quantité d'air. Enfin, après un certain nombre de coups, si la pompe est bien faite, l'eau arrive au-dessus de la première soupape, elle monte de plus en plus, soulève elle-même la seconde soupape, et passe au-dessus du piston. A partir de cet instant, tout l'air est chassé, et la pompe joue dans l'eau: chaque fois que le piston monte, il soulève toute la colonne d'eau qui est au-dessus de lui, et il entraîne celle qui est au-dessous ; chaque fois qu'il descend, la première soupape se ferme, la sienne s'ouvre, et il s'en vient prendre par sa base la colonne qu'il avait entraînée, pour la soulever à son tour. L'effort qu'il faut faire pour soulever le piston se compose de deux parties : l'une est le frottement ; l'autre est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base le piston lui-même, et pour hauteur toute la hauteur à laquelle se trouve l'orifice par lequel l'eau s'écoule dans l'air.

Pour qu'une pompe soit bonne, il faut que l'eau puisse atteindre à la première soupape *r* : ainsi, la position de cette soupape dépend du degré de raréfaction que l'on peut donner à l'air qui est au-dessus d'elle, et ce degré de raréfaction dépend lui-même de l'étendue de la course du piston et de la distance des deux soupapes *t* et *r*. Quand cette distance est nulle, le vide est possible, et, à la rigueur, la soupape *r* pourrait être à 32 pieds de hauteur au-dessus du niveau de l'eau qu'il s'agit d'élever. Si cette distance était seulement de 1 décimètre, et que le piston n'eût que 2 décimètres de course, l'air ne pourrait être amené par le jeu de la pompe qu'à une demi-pression atmosphérique, et la soupape *r* ne pourrait être tout au plus qu'à 16 pieds de hauteur. Il est facile de calculer la relation générale qui existe entre ces divers élémens.

108. *Pompe aspirante et foulante, à corps de pompe alésé.* — Cette pompe (*fig.* 162) se compose d'un tuyau d'aspiration *a*, d'un tuyau d'ascension *s*, d'un corps de pompe *c*, et d'un

piston p ; mais elle a seulement deux soupapes, r et l, d'aspiration et d'ascension ; rien ne passe au travers du piston ni sur son contour, et sa face supérieure est toujours en communication libre avec l'atmosphère.

Quand le piston monte, l'eau est aspirée au-dessus de la soupape r, et, quand il descend, elle est comprimée, presse la soupape r et soulève la soupape l.

109. *Pompe aspirante et foulante, sans corps de pompe alésé.* — Cette pompe, représentée dans la figure 163, diffère de la pompe précédente par la forme et l'ajustement du corps de pompe et du piston. Les deux soupapes r et l du tuyau d'aspiration a et du tuyau d'ascension s sont aussi un peu différentes ; elles présentent une disposition très-heureuse, surtout pour les grandes pressions : la première r se compose de deux clapets inclinés qui viennent *butter* contre les arrêts i et i' quand ils sont soulevés par l'aspiration, et qui retombent sur le prisme z quand ils sont pressés de haut en bas pendant que le piston descend ; la seconde l se compose d'un seul clapet incliné. L'ajustement que l'on voit au-dessus est un *regard* pour visiter la soupape et la changer au besoin.

Le corps de pompe n'est point alésé, parce que le piston ne le touche pas.

Le piston est un cylindre de métal, parfaitement cylindrique, qui passe dans la boîte à étoupes e, et dans la boîte à graisse g; c'est là qu'est la véritable fermeture de la pompe.

Il est indispensable de ménager un petit conduit pour donner issue à l'air qui se dégage de l'eau et qui pourrait mettre la pompe hors de service en remplissant le corps de pompe. On peut le faire de deux manières : ou en perçant l'épaisseur du corps de pompe, ou en forant le piston dans sa longueur et ensuite latéralement, comme le représente la fig. 163, en *tyu*; t est la vis de pression qui ferme l'ouverture de ce conduit.

M. Martin a établi à Marly des pompes de cette espèce, qui sont construites avec une rare perfection; elles élèvent l'eau à 500 pieds au-dessus du niveau de la Seine.

110. *Pompe des prêtres.* — Dans cette pompe, le piston est remplacé par une membrane élastique (*fig.* 164) qui est arrêtée par ses bords, et qui offre en son milieu une soupape de métal *s'*. Quand la tige *t* soulève la membrane, le liquide est aspiré et entre par la soupape *s* : au contraire, quand la tige est abaissée, le liquide, comprimé entre les deux soupapes, soulève la soupape *s'* pour passer au-dessus du piston élastique.

C'est une pompe de cette espèce qui sert à faire monter l'huile dans les lampes de Gotten ; on la dispose alors comme dans la fig. 165 : *cc rr* représente la section verticale d'une petite caisse en cuivre qui est séparée en deux parties par la cloison *l*; la partie de droite se subdivise sur sa longueur en trois ou quatre petits compartimens semblables à celui que représente la figure. Une peau très-fine est alternativement soulevée et déprimée au moyen du fil *f*: quand elle se soulève, l'huile du réservoir *r* entre par la soupape *s*; quand elle se déprime, l'huile est refoulée et passe par la soupape *s'* pour monter dans le tube d'ascension *t*. Trois compartimens ou trois pompes, ayant leurs soupapes séparées, suffisent pour la continuité du mouvement : l'une est au-dessus de sa course, l'autre au milieu, la troisième à la fin, et l'huile est toujours poussée dans le tuyau d'ascension avec une force à-peu-près égale. C'est un mouvement d'horlogerie qui met en jeu toutes ces pompes.

111. *Presse hydraulique.* — Cette machine offre de si grands avantages dans les exploitations agricoles et industrielles, qu'il nous a semblé nécessaire d'indiquer ici les détails de sa construction. Elle est représentée dans les fig. 170, 171, 172, 173 et 174.

Fig. 173. Elévation générale de la presse.

Fig. 170. Coupe verticale.

Fig. 172. Cuir embouti.

Fig. 171. Pièces qui servent à ajuster le piston de la pompe.

Fig. 174. Détails de la soupape de pression.

Il y a deux parties distinctes dans la presse hydraulique, savoir : une pompe aspirante et foulante qui donne la pression, et un plateau à piston qui la reçoit pour la transmettre immédiatement aux corps que l'on veut presser.

La pompe est vue dans l'élévation en *af* (*fig.* 173), et beaucoup plus en grand dans la coupe verticale, en *af* (*fig.* 170).

Le plateau à piston est vu dans l'élévation en *p' p* (*fig.* 173), et beaucoup plus en grand dans la coupe verticale, en *p* (*fig.* 170) (ici le plateau *p'* est enlevé, il ne reste que le piston).

La pompe donne la pression au piston *p* au moyen du tuyau *tbu*, fig. 170 et 173.

En levant le levier *l* (*fig.* 173), on soulève le piston *s* de la pompe (*fig.* 170), l'eau de la bache *b* (*fig.* 173) entre par la pomme d'arrosoir *r* (*fig.* 170), soulève la soupape *i* et passe sous le piston *s* : quand on presse sur le levier *l*, on fait redescendre le piston *s*, l'eau est refoulée, elle ferme la soupape *i*, gagne le conduit *z* (*fig.* 170), soulève la soupape *d*, et passe dans le tuyau *tbu* pour arriver dans le corps *cc'* de la presse (*fig.* 170 et 173). Là, elle exerce son effort contre le piston *p* et le force à monter avec le plateau *p'*, qui presse à son tour les corps contre la plate-forme *ef* (*fig.* 173).

Si la section du piston *s* est la centième partie de la section du piston *p*, un effort d'un kilogramme sur le premier produira, de bas en haut sur le second, une pression de 100 kilogrammes. Or, au moyen du levier *l*, un homme peut aisément exercer sur le piston *s* un effort de 300 kilogrammes ; ainsi, le piston peut sans difficulté être poussé avec une puissance de 30,000 kilogrammes.

Tel est le principe fondamental de la presse hydraulique. Nous indiquerons maintenant comment on mesure les pressions et comment on est parvenu à éviter les fuites.

Les pressions se mesurent au moyen de la soupape *g* (*fig.* 170 et 174). Connaissant le poids *p*, sa distance *yf* au point d'appui *f*, la distance *xf* du point par lequel le levier presse sur la soupape, et enfin la section de la soupape, il est facile de calculer la pression qu'elle éprouve de la part du liquide lorsque le levier *fy* est soulevé.

Pour éviter les fuites, on ajuste d'abord avec un soin particulier le piston *s*; les pièces qui servent à cet usage sont vues en grand dans la fig. 171, c'est la même disposition que dans la pompe de Marly (*fig.* 163, pl. 7). Mais la principale difficulté se trouvait au piston *p*; et c'est Bramah qui l'a résolue par l'heureuse invention du cuir embouti, dont on voit une coupe (*figure* 172). Ce cuir est disposé en *mm'* (*fig.* 170), dans un espace annulaire, pratiqué à cet effet dans le corps *cc'* de la presse; il est facile de voir par sa forme et sa disposition qu'il ferme d'autant mieux que la pression est plus forte ; car l'effet de la pression est de le pousser en même temps contre le piston *p*, qu'il embrasse étroitement, et contre les parois de l'espace annulaire.

La vis *k* sert à la *dépression* : lorsqu'on la détourne, le liquide revient du corps de la presse par le tube *ubt* et s'échappe par l'ouverture *v*.

112. *Bélier hydraulique.* — Cette machine, qui fut découverte en 1797, par Mongolfier, l'inventeur des aérostats, n'est pas moins remarquable par le principe nouveau sur lequel elle repose que par les nombreux avantages qu'elle peut offrir. Nous essaierons d'abord de faire comprendre le principe de mécanique d'où elle tire sa force motrice. Un corps quelconque, solide ou fluide, étant animé d'une certaine vitesse, imaginons que l'on arrête quelques-unes de ses parties, à l'instant toutes les autres, qui ne sont pas directement arrêtées, vont exercer sur celles-ci des efforts différens: celles qui sont en avant tendront à les entraîner après elles ou à s'en séparer; celles qui sont en arrière, voulant aussi continuer leur route, se précipiteront en vertu de leur vitesse

acquise, et se presseront les unes sur les autres en même temps qu'elles presseront les parties immobiles. Une flèche, par exemple, étant animée d'un mouvement rapide, si on l'arrêtait tout-à-coup par le milieu, la partie antérieure, tendant à entraîner la partie arrêtée, éprouverait une traction dans toute sa longueur, et cet effort pourrait la rompre si la vitesse était assez grande : au contraire, la partie postérieure, tendant à pousser la partie arrêtée, éprouverait une pression dans toute sa longueur, et toutes ses tranches seraient refoulées les unes sur les autres. De même, quand une colonne d'eau est en mouvement dans un tube et que tout-à-coup un obstacle l'arrête, elle presse cet obstacle en vertu de sa vitesse acquise ; la première tranche qui le touche est bientôt arrêtée et pressée à son tour par la tranche qui vient après, et ainsi *successivement* jusqu'à la tête de la colonne ; pendant ce temps, qui est très-court, le tuyau supporte un excès de pression latérale, dépendant de son diamètre et de la vitesse de l'eau, et c'est cet excès de pression résultant du mouvement arrêté qui devient la force motrice du bélier hydraulique.

tt' (*fig.* 169) est un tuyau dans lequel se meut l'eau d'une source avec une vitesse dépendante de la hauteur de la chute; c'est le *corps du bélier*. L'eau s'écoulerait par l'orifice *v*, s'il n'y avait pas d'obstacle, et gagnerait le niveau *nn'*, qui est le niveau naturel au-dessous de la chute, mais, vers cette extrémité du tuyau, on ajuste diverses pièces qui forment la *tête du bélier* : *s* est une soupape dont la densité est double de celle de l'eau ; l'eau peut la soulever par sa vitesse, et l'appliquer contre l'ouverture *v* qui se trouve alors exactement fermée ; on l'appelle *soupape d'arrêt*. Quand la soupape *s* est fermée, l'eau passe par le conduit *z* et s'élève dans le vase en fonte *bb'*, d'où elle passe, par le clapet *c*, dans la grande cloche en fonte *hh'*, pour gagner enfin le tuyau d'ascension *dek*. Là, elle s'arrêterait lorsqu'elle serait parvenue à la hauteur du niveau supérieur de la chute, s'il n'y

avait pas une force motrice capable de la pousser plus haut. Mais cette force se développe de la manière suivante : l'eau de la source, ayant acquis assez de vitesse par son écoulement naturel, soulève la soupape *s* et ferme l'ouverture *v* ; alors la pression latérale résultant du mouvement arrêté exerce un effort sur tous les points de la paroi du tuyau. Cette pression pousse le liquide en *z*, le clapet *c* est soulevé, et l'eau passe dans la cloche *hh'* : la durée de cette ascension est un peu prolongée par la réaction élastique de toutes les pièces de l'appareil. Bientôt le clapet *c* et la soupape *s* retombent par leur poids, l'un pour fermer l'ouverture du vase *bb'*, et l'autre pour ouvrir l'orifice d'écoulement. La série des effets rapides qui se succèdent jusqu'à cet instant est ce que l'on nomme un *coup de bélier*. Dès que l'écoulement naturel a recommencé, la vitesse s'accélère promptement ; la soupape *s* est de nouveau soulevée, et les mêmes phénomènes se reproduisent. On détermine par des essais la disposition des pièces, et surtout le jeu qu'il faut donner à la soupape *s* pour obtenir le plus grand effet possible. La limite de hauteur à laquelle on peut élever l'eau par cet appareil dépend du diamètre du tuyau et de la vitesse que l'eau peut prendre en le traversant.

On voit en *p* un piston qui sert à rendre de l'air pour remplacer celui qui est, en *i*, dans le vase *bb'* et qui se dissout peu-à-peu ; l'air rentre de lui-même et par le jeu de l'appareil.

Il paraît que dans la pratique le bélier donne plus de 60 pour 100 de la force réelle de l'eau de la source ; c'est à-peu-près ce que peuvent donner les *roues-à-pots* les mieux construites ; les *roues en dessous* ne donnent qu'environ 25 ou 30 pour 100.

CHAPITRE IX.

Du mouvement des Gaz.

113. Les gaz peuvent s'écouler, comme les liquides, par des orifices en minces parois, par des ajutages ou par des tuyaux; ils peuvent s'écouler aussi sous des pressions constantes ou sous des pressions variables. Les appareils au moyen desquels on obtient des écoulemens constans se nomment des *gazomètres*.

114. *Des Gazomètres.* — Lorsqu'on recherche une grande précision, l'écoulement constant du gaz est produit par l'écoulement constant d'un liquide; rien n'est plus commode pour cet usage que le vase de Mariotte. On le dispose alors comme dans la figure 133 : le grand col du ballon est mastiqué dans le réservoir de gaz; l'eau tombe par l'orifice v; s'il en arrive 20 litres en 1', il faut que 20 litres de gaz soient chassés dans le même temps par les orifices ou par les tuyaux d'écoulement. Pour appliquer ce principe aux gaz différens de l'air, on les recueille dans de grandes vessies ou dans des ballons de baudruche que l'on enferme dans un second réservoir; l'air qui sort du premier réservoir arrive dans le second, et exerce sur ses membranes élastiques une pression constante qui produit de même un écoulement constant.

Les grands gazomètres de l'éclairage sont construits sur un autre principe : un cylindre à un seul fond (*fig.* 166) est renversé sur une grande citerne remplie d'eau. Ce cylindre est en feuilles minces de métal, et a, par exemple, 10 mètres de diamètre, contient 100 mètres cubes de gaz, et pèse, je suppose, 10000 kilogrammes. Il n'enfonce pas dans l'eau,

puisqu'il est plein de gaz ; seulement il presse de tout son poids sur ce gaz intérieur, et le tient à une pression plus forte que la pression atmosphérique. Dans notre hypothèse, cet excès de pression serait de 10000 kilogrammes sur une base de 10 mètres de rayon ; ce qui fait à-peu-près une colonne d'eau de 13 centimètres. Si l'on conçoit maintenant que du fond de la citerne s'élève uu tube qui vienne d'une part s'ouvrir un peu au-dessus du niveau intérieur de l'eau pour communiquer avec le gaz du gazomètre, et qui s'en aille d'une autre part se subdiviser en une foule de ramifications terminées par des becs d'éclairage, on verra qu'il suffit de tourner un robinet pour éclairer une grande ville. L'écoulement du gaz sera constant, parce que le gazomètre ne fera qu'une petite perte de poids en s'enfonçant dans l'eau de la citerne ; au reste, on peut, avec des contre-poids, lui donner encore plus de régularité ou modérer sa pression. Pour remplir le gazomètre, on ferme le robinet de distribution, et l'on ouvre un autre robinet qui établit la communication entre les cornues où se forme le gaz et le tube vertical qui s'élève du fond de la citerne au-dessus du niveau intérieur de l'eau.

115. *Loi de l'écoulement des gaz d'après la théorie de Daniel Bernouilli.* — Daniel Bernouilli avait supposé que le théorème de Torricelli s'applique aux gaz comme aux liquides, et, en partant de ce principe, il exprimait la vitesse d'écoulement d'un gaz par la formule suivante :

$$v = \sqrt{2k\frac{(p-p')}{p}}$$

v est la vitesse d'écoulement.

p la pression intérieure.

p' la pression extérieure.

$2k$ un coefficient constant égal à 155610 pour l'air à la température de la glace fondante, et dont les valeurs chan-

gent en raison inverse des densités pour les autres gaz pris à la même température.

116. *Loi de l'écoulement des gaz d'après la théorie de M. Navier.* Tous les géomètres qui s'étaient occupés de l'écoulement des fluides élastiques avaient adopté les principes de Daniel Bernouilli : mais M. Navier a établi une théorie nouvelle dans un mémoire très-remarquable (Mémoires de l'Académie des Sciences pour 1830). D'après M. Navier, la vitesse d'écoulement est exprimée par la formule :

$$v = \sqrt{2\,k\,(\mathrm{Log}\,p - \mathrm{Log}\,p)}$$

Les mêmes lettres désignent les mêmes choses que dans la formule précédente, mais le coefficient $2\,k$ doit être multiplié par 2,30206 lorsqu'on veut se servir des tables de logarithmes ordinaires.

Cette formule ne s'applique qu'au cas où l'orifice d'écoulement est très-petit par rapport à la section du gazomètre.

Il est facile de voir que ces deux formules donnent à très-peu près les mêmes résultats lorsque la pression p ne surpasse que très-peu la pression p', et qu'elles donnent des résultats bien différens quand les pressions intérieures et extérieures présentent une grande différence ; par exemple, quand l'air ordinaire rentre dans le vide.

117. Les vitesses données par les formules précédentes sont les *vitesses théoriques*, et, pour vérifier la théorie, il est nécessaire de les comparer aux *vitesses effectives* ; celles-ci se déterminent par l'expérience, comme pour les liquides, en observant le volume de gaz qui sort dans un temps donné. Les expériences les plus précises qui aient été faites sur ce sujet sont dues à M. Lagerjhelm (Mém. de l'Acad. de Stockholm, 1822), et à M. D'Aubuisson (Ann. des Mines, 1826). Les vitesses effectives trouvées par ces habiles observateurs sont moindres que la vitesse théorique donnée par la formule de

M. Navier; on en conclut que la *veine gazeuse* éprouve *une contraction*, comme la *veine liquide* ; et, en cherchant quelle grandeur il faudrait donner à la *section contractée* pour que la théorie représentât tous les résultats de l'expérience, on trouve que cette section devrait être égale à celle de l'orifice multipliée par 0,61 ou 0,62. Ainsi, il y a dans les gaz contraction de la veine fluide, et cette contraction est sensiblement la même que dans les liquides.

Quand les gaz s'écoulent du gazomètre par des ajutages coniques ou cylindriques dont la longueur est tout au plus 7 ou 8 fois le diamètre, on trouve que la dépense est plus grande que par les orifices en minces parois, comme pour les liquides; mais, jusqu'à présent, il n'y a pas un assez grand nombre d'expériences pour faire dans ce cas une comparaison exacte entre la dépense effective et la dépense théorique.

118. *Machines soufflantes.* — On emploie pour les hauts-fourneaux et les grands feux de forge des machines soufflantes de formes très-différentes. Nous avons représenté dans la figure 167 celle qui est maintenant adoptée dans les meilleures usines : *cc* est un cylindre de fonte alesé ; *p*, un piston dont la tige *t* passe dans une boîte à étoupes *d* ; le fond supérieur et le fond inférieur du cylindre portent latéralement chacun deux soupapes, *a*,*b'* et *a'b*. Les deux soupapes *a* et *a'* sont les *soupapes d'aspiration*, elles s'ouvrent de dehors en dedans; les deux soupapes *b* à *b'* sont les *soupapes d'expiration*, elles s'ouvrent de dedans en dehors. Une roue hydraulique, ou une machine-à-vapeur, imprime le mouvement de va-et-vient au piston. On voit que, pendant la descente, les soupapes *a* et *b* sont seules ouvertes, la première pour aspirer et la seconde pour expirer ; c'est le contraire pendant l'ascension. L'air expiré et comprimé est recueilli dans le tuyau *gh* pour être de là conduit au foyer.

Le *soufflet d'appartement* (*fig.* 168) est, en quelque sorte, plus compliqué que la machine-à-piston ; cependant, d'après

ce que nous venons de dire, on pourra aisément se rendre compte de ses effets.

Le soufflet de maréchal n'est autre chose qu'un grand soufflet d'appartement.

119. *Des pressions latérales des gaz pendant l'écoulement.* — Il se produit, dans les grandes souffleries des forges, un phénomène remarquable qui a été décrit par M. Clément-Désormes. (Ann. de Phys. et de Chim., t. 36, p. 69.) Une ouverture de 1 à 2 pouces de diamètre étant faite dans la paroi *plane* d'un réservoir d'air comprimé, l'air s'échappe avec une grande violence: mais, si on en approche un disque de bois ou de métal de 7 ou 8 pouces de diamètre, et qu'après avoir vaincu la première résistance on l'applique sur l'ouverture, il n'est plus repoussé comme auparavant; il oscille vivement, en s'éloignant ou en se rapprochant de l'ouverture dans des limites très-rapprochées; l'air continue à s'échapper avec grand bruit, entre la surface du disque et celle de la paroi; et, si alors on voulait retirer le disque, il faudrait un grand effort : quoique séparé de la paroi, il semble collé contre elle. M. Clément-Désormes donne de ce phénomène une explication qui semble tout-à-fait conforme aux principes du mouvement des fluides. La veine qui sort de l'ouverture doit s'épanouir en lame très-mince pour passer entre le disque et la paroi (*fig.* 175); son épaisseur restant la même, elle doit s'élargir à mesure qu'elle approche de la circonférence du disque; ainsi, elle se trouve dans le même cas que la veine fluide qui doit remplir un cône dont les sections deviennent toujours croissantes; de là une espèce de succion toute pareille aussi à celle que l'on observe dans les ajutages coniques.

LIVRE DEUXIÈME.

DE LA CHALEUR.

Notions générales.

120. L'AIR, l'eau et les différens corps de la nature, peuvent exciter en nous des sensations particulières, que l'on appelle sensations de *chaleur* ou de *froid*. Ces affections se produisent au contact immédiat ou à de grandes distances, et elles sont d'une telle nature que nous ne pouvons en attribuer la cause à la substance propre des corps. En présence d'un foyer allumé, nous jugeons facilement que ce n'est pas la matière du charbon qui vient sous forme invisible nous toucher et nous réchauffer; et quand nous recevons les rayons solaires, nous jugeons de même que ce n'est pas la matière pondérable du soleil qui descend vers la terre, pour produire sur nos yeux l'impression de la lumière, et sur toutes les parties sensibles de notre organisation l'impression de la chaleur. Il y a donc un *agent* qui est distinct de la substance propre des corps, qui réside dans leur masse, qui se transmet à distance, qui établit une communication continuelle entre eux et nous, et qui est la *cause* des sensations de chaleur ou de froid que nous éprouvons. Cet agent a reçu différens noms : d'abord, confondant la cause avec l'effet, on l'a appelé *chaleur ;* ensuite, par des notions plus justes sur son mode d'existence, on l'a nommé *fluide igné*, *matière du feu*, etc. ; enfin, à la réforme de la nomenclature chimique, Lavoisier , Bertholet , Morveau et Fourcroy l'ont appelé *calorique*. Cette dénomination a été adoptée par tous les phy-

siciens; et l'on a conservé le mot *chaleur* pour désigner la science qui traite des propriétés, des effets et des lois du calorique.

Cependant, on ne s'en tient pas toujours à ces strictes définitions : il arrive souvent que le mot *chaleur* est employé pour désigner l'agent lui-même qui produit les phénomènes, et que le mot *calorique* est aussi employé pour désigner l'ensemble de nos connaissances sur ces phénomènes et sur leurs lois.

121. Le calorique n'agit pas seulement sur les corps organisés, mais il agit aussi sur les corps inorganiques. La glace peut fondre, l'eau peut entrer en ébullition, le fer peut rougir au feu; tous ces phénomènes, et tant d'autres de même espèce, ont nécessairement une cause, et nos sens nous avertissent que cette cause est le calorique. Il y a une telle correspondance, une telle simultanéité entre ces modifications qui surviennent dans les corps et les changemens qui surviennent dans nos sensations, que nous craignons peu de nous tromper en portant ce jugement. Ces seules indications peuvent nous servir à classer les phénomènes du calorique, et à établir d'avance l'ordre dans lequel nous devons en faire l'étude.

Nous diviserons la théorie de la chaleur en *deux parties*. La *première partie* aura pour objet les *deux effets physiques* que le calorique produit dans les corps, savoir : 1° les *changemens de volume* ou la *dilatation;* et 2° les *changemens d'état* ou le passage de l'état solide à l'état liquide, et de l'état liquide à l'état de vapeur.

La *seconde partie* aura pour objet : 1° la *propagation du calorique*, qui comprend la *conducibilité* ou la propagation au contact, et le *calorique rayonnant* ou la propagation à distance; 2° la *calorimétrie* ou la mesure des quantités de calorique qui sont nécessaires pour produire des effets déterminés.

Nous essaierons d'abord de donner une première idée des

phénomènes qui servent de base à ces divisions de la théorie de la chaleur; ces indications générales sont d'autant plus nécessaires, que nous ne pourrons traiter de la deuxième partie de la chaleur qu'après avoir vu l'Optique.

122. Changemens de volume. — Nous avons vu (13) que le calorique *dilate* tous les corps, que le volume d'un corps quelconque dépend du degré de chaleur qu'il éprouve, et que, toutes choses égales d'ailleurs, le même degré de chaleur lui donne toujours exactement le même volume. Ainsi, les degrés de dilatation peuvent nous servir à mesurer les degrés de chaleur. On appelle *température* d'un corps l'état de volume qu'il prend sous l'influence du calorique; et l'on appelle *thermomètres* les instrumens qui servent à mesurer les températures.

La figure 176 représente un *thermomètre-à-mercure;* la *boule b* est pleine de mercure, et ce liquide s'élève dans la *tige t* jusqu'à une certaine hauteur *h*, qui dépend de la température. Lorsqu'on chauffe la boule, le mercure *augmente* de volume, le thermomètre *monte*, et l'on dit que la *température s'élève*: lorsqu'on la refroidit, le mercure *diminue* de volume, le thermomètre *descend*, et la *température s'abaisse*. Toutes les fois que le thermomètre revient au même point ou au même état de volume, la température est la même. Si l'on prenait un autre thermomètre-à-mercure plus grand ou plus petit que le premier, ces deux instrumens monteraient et descendraient ensemble; mais les ascensions et les dépressions pourraient être très-différentes : les *réservoirs* étant égaux, il suffirait, par exemple, que le tube du premier eût un diamètre dix fois moindre que le tube du second pour que ses mouvemens eussent cent fois plus d'étendue; quand il monterait de 100 millimètres, le second ne monterait que de 1 seul millimètre. L'un serait cent fois plus *sensible* que l'autre.

Ces thermomètres ne pourraient servir qu'à indiquer des températures *égales*, des températures *plus hautes*, et des

températures *plus basses*, suivant que le sommet de la colonne reviendrait à un même point fixe, ou qu'il varierait au-dessus ou au-dessous de ce point. De cette manière, ils pourraient déjà être de quelque avantage pour la science ; mais, ce qu'il y a d'essentiel dans les thermomètres, c'est leur *graduation* : car ce n'est qu'en les graduant que l'on peut parvenir à exprimer les températures par des nombres, à les comparer entre elles, et à en déduire les lois du calorique.

Les principes de la *graduation* des thermomètres reposent sur ce fait, qu'il y a des phénomènes qui se produisent toujours à la même température. Ainsi, en prenant dans la paume des mains un des thermomètres précédens, on le verra monter plus ou moins, suivant que l'on aura les mains plus chaudes ou plus froides. Mais si l'on a la patience d'attendre et de tenir les mains pressées jusqu'à ce qu'elles se soient réchauffées le plus possible, on verra le thermomètre qu'elles tiennent enfermé monter lentement jusqu'à une certaine limite, où il arrivera toujours, et qu'il ne dépassera jamais. Dans toutes les saisons, sous tous les climats et chez tous les individus, il s'arrêtera au même point ou à très-peu près. Ainsi la température du corps humain est une température constante, et elle offre un *point fixe*, que l'on pourrait prendre pour point de départ dans l'évaluation numérique des températures. Cependant, il y a d'autres phénomènes qui sont plus mathématiquement constans, et auxquels il est plus simple de recourir : tels sont, par exemple, les changemens d'état des corps.

123. Changemens d'état. La plupart des corps solides peuvent passer à l'état liquide : ainsi la glace se fond et donne naissance à de l'eau qui a la même composition chimique que la glace elle-même, c'est seulement un autre état d'agrégation des molécules : il en est de même de la cire, du plomb, de l'or, du fer, etc.; ces corps sont appelés corps fusibles, parce que leurs élémens matériels, sans être séparés ou modifiés

chimiquement, peuvent prendre l'état liquide sous l'influence de la chaleur, et revenir ensuite à l'état solide.

La plupart des corps liquides peuvent passer à l'état de vapeur ou de fluide élastique : ainsi quand on fait bouillir de l'eau dans un vase, la masse d'eau diminue rapidement, et cependant les molécules d'eau qui semblent disparaître ne sont ni détruites ni modifiées chimiquement ; elles prennent l'état de vapeur, c'est-à-dire qu'elles forment alors un fluide élastique analogue à l'air; et si cette vapeur est recueillie et refroidie, elle reproduit exactement tout le poids d'eau qui avait disparu. Il en est de même de l'alcool, de l'éther, du mercure, du zinc, du sel ordinaire, etc.

Pour produire ces changemens d'état, c'est-à-dire pour *fondre* ou pour *vaporiser* les corps, il faut leur donner une certaine température. Or, on a observé d'abord ce fait fondamental, qu'un même corps se fond toujours exactement à la même température : ainsi, dans la *glace fondante*, un thermomètre revient toujours exactement au même point, soit que cette glace ait été formée artificiellement, soit qu'elle ait été formée naturellement au-dessus des montagnes, sur les rivières ou sur les mers. Il en est de même de la cire, du plomb, etc. Chaque corps a son point de fusion qui est parfaitement fixe.

On a observé ensuite qu'il en est de même du *point d'ébullition*; ainsi, quand l'eau bout avec force, en poussant le feu plus vivement on arrive à la faire bouillir plus vite, mais non pas à la chauffer davantage ; le thermomètre reste au même point parfaitement immobile : il en est de même des autres liquides, chacun a son point particulier d'ébullition. Nous devons ajouter, toutefois, que pour chaque liquide le point d'ébullition change avec la pression que supporte la surface du liquide, et qu'il change par conséquent avec la hauteur du baromètre; mais, pour la même pression, le point d'ébullition est fixe.

Concevons maintenant que l'on prenne deux points fixes, celui de la glace fondante, par exemple, et celui de l'eau

bouillante, et que, les ayant marqués l'un et l'autre sur la tige du thermomètre, on divise en cent parties égales l'intervalle qui les sépare, et que l'on continue les divisions au-dessus et au-dessous des points extrêmes : on aura ainsi un *thermomètre gradué*, qui s'appelle *thermomètre centésimal.* Le *zéro* ou le commencement de l'échelle se met au point de la glace fondante, et les divisions qui sont au-dessous du zéro se distinguent par le signe *moins* : ainsi, — 10°, — 20° signifient dix degrés, vingt degrés au-dessous de la glace fondante.

124. Propagation du calorique. — Le calorique se propage au contact dans l'intérieur des corps, et à distance au travers de l'air et des différens autres milieux.

Au contact, il se répand de proche en proche, jusqu'aux molécules les plus intérieures des corps. Au feu de forge, par exemple, les pièces de fer sont d'abord échauffées à leur surface, puis le calorique gagne peu-à-peu, et pénètre enfin toute l'étendue de la masse qui est enveloppée de feu. Cette propagation intérieure du calorique est ce que l'on appelle la *conducibilité* ou la *conductibilité;* elle est plus ou moins rapide, suivant la nature des corps. On nomme *bons conducteurs* ceux qui se laissent pénétrer facilement par la chaleur, et qui prennent rapidement la température qu'ils doivent avoir; et *mauvais conducteurs* ceux qui se laissent pénétrer moins facilement, et qui sont plus lents à se mettre en équilibre de température dans toutes leurs parties. Les métaux sont en général de bons conducteurs.

Le verre, le soufre, le charbon, les pierres de différentes espèces, toutes les substances végétales et animales, sont en général de mauvais conducteurs; les liquides et les gaz sont les plus mauvais conducteurs que l'on connaisse.

A distance, le calorique se propage à-peu-près comme la lumière : il traverse le vide avec une grande vitesse, comme la lumière traverse les espaces célestes; il passe dans certains corps sans s'y arrêter, sans les rendre chauds, à-peu-près

comme la lumière passe dans le verre, sans s'y éteindre et sans le rendre lumineux. Ce mode de propagation est ce que l'on appelle le *rayonnement du calorique* : c'est par rayonnement que le calorique du soleil arrive à la terre; c'est aussi par rayonnement qu'un foyer nous échauffe à travers les couches d'air qui nous séparent de lui, et qu'un corps très-peu chaud nous fait sentir sa présence, même à une assez grande distance. Le *calorique rayonnant* devient du calorique ordinaire, lorsqu'il est absorbé par les corps et qu'il se répand par la conducibilité dans les différentes parties de leur masse ; et, réciproquement, le calorique qui s'échappe des corps à mesure qu'ils se refroidissent, s'échappe sous la forme de calorique rayonnant, à moins qu'il ne rencontre immédiatement des corps qui l'absorbent et dans lesquels il ne puisse passer que de molécule à molécule.

125. Calorimétrie. — La calorimétrie comprend : 1° le calorique spécifique; 2° le calorique latent; 3° la mesure des quantités de chaleur qui sont données ou absorbées par les différentes sources de chaleur ou de froid.

Le *calorique spécifique* d'un corps est le nombre des unités de chaleur que 1 kilogramme de ce corps exige pour que sa température s'élève de 1°. L'*unité de chaleur* étant conventionnelle comme toutes les unités dont on se sert pour estimer numériquement les grandeurs, on est convenu de prendre pour unité de chaleur la quantité de chaleur qui est nécessaire pour élever de 1° au-dessus de 0 la température de 1 kilogramme d'eau; car cette quantité est toujours constante. Ainsi, quand on dit que le calorique spécifique du mercure est $\frac{1}{30}$, cela signifie que pour élever de 1° la température de 1 kilogramme de mercure il ne faut que le $\frac{1}{30}$ de la quantité de chaleur qui est nécessaire pour élever de 1° la température de 1 kilogramme d'eau. *Capacité pour la chaleur* et *calorique spécifique* sont deux expressions synonymes; la première semble mieux indiquer que la quantité de chaleur nécessaire pour produire dans un corps un changement de

température déterminé est tout-à-fait dépendante de la substance propre du corps, et qu'elle est plutôt une propriété de cette substance elle-même qu'une propriété du calorique.

Le *calorique latent* d'un corps est le nombre des unités de chaleur que ce corps absorbe ou dégage au moment où il change d'état. Il est nécessaire d'en citer ici un exemple pour faire bien comprendre cette définition : 1 kilogramme de glace à la température de *zéro*, et un kilogramme d'eau à la température de 75°, donnent, après leur mélange et après la fusion complète de la glace, deux kilogrammes d'eau à la température 0. Ainsi la glace a été fondue, mais elle n'a pas changé de température; l'eau chaude à 75° est restée liquide, mais elle s'est refroidie jusqu'à la température de la glace. Donc, le kilogramme de glace, *pour se fondre*, a *absorbé* tout le calorique qu'a perdu le kilogramme d'eau, en descendant depuis 75° jusqu'à 0; il l'a absorbé pour se fondre, puisque sa température n'a pas changé. Le calorique absorbé et comme dissimulé dans la masse liquide qui résulte de la fusion est le *calorique latent* ou le *calorique de fusion*. L'eau en se congelant reproduit et dégage de nouveau, pendant sa *solidification*, tout le calorique qu'elle avait absorbé pendant sa fusion; c'est-à-dire qu'un kilogramme de glace à 0 et un kilogramme d'eau à 0 n'ont pas la même quantité de chaleur, quoique étant à la même température; l'eau en a plus que la glace, et ce qu'elle en dégage pendant qu'elle se congèle, serait capable d'élever un autre kilogramme d'eau de 0 à 75°.

Le même phénomène se produit dans le passage de l'état liquide à l'état de vapeur. Au moment de sa formation, la vapeur se trouve à la même température que le liquide qui lui donne naissance : mais, à poids égal, elle a beaucoup plus de calorique; car elle en absorbe, à mesure qu'elle se forme, bien plus encore que la glace n'en absorbe à mesure qu'elle se fond. Ce calorique absorbé et dissimulé dans la

masse gazeuse de la vapeur s'appelle encore *calorique latent*, et quelquefois *calorique de vaporisation* ou *calorique d'élasticité*. Quand la vapeur revient à l'état liquide, elle reproduit et dégage de nouveau, pendant sa *condensation*, toute cette quantité de calorique qu'elle avait dû prendre pendant sa formation.

Ces absorptions de calorique en proportions différentes, pendant la fusion et la vaporisation, et les reproductions égales pendant la solidification et la condensation se manifestent nécessairement dans tous les corps. Le phénomène de la chaleur latente est une condition essentielle des changemens d'état.

Les sources de chaleur et de froid dégagent et absorbent des quantités de chaleur qui peuvent être mesurées et exprimées numériquement comme le calorique spécifique et le calorique latent; pour le comprendre, il suffit de jeter un coup d'œil sur les phénomènes naturels et d'examiner les causes générales de réchauffement et de refroidissement. En effet, le calorique peut être accumulé dans les corps, mais il ne peut pas y être retenu et enfermé, comme l'air, l'eau et les autres fluides pondérables sont enfermés dans les vases. Aucune substance n'est impénétrable au calorique : c'est un fluide *incoercible* qui est sans cesse en mouvement pour se communiquer de proche en proche dans les corps contigus, ou pour se répandre dans l'espace sous forme rayonnante. Si un corps, tel qu'un boulet, par exemple, était enfoncé à 10 pieds sous terre, tout le monde sait que sa chaleur se communiquerait aux couches environnantes, puis de celles-ci aux suivantes, et ainsi de proche en proche jusqu'à de très-grandes distances: après un temps assez long, ce boulet serait refroidi, mais aucune portion de sa chaleur ne serait perdue; elle serait répandue dans les corps voisins, et l'on pourrait, à la rigueur, la retrouver et la recueillir en totalité. Lorsqu'un corps se refroidit dans l'air, le phénomène est différent : une portion de sa chaleur passe aux molécules d'air

qui le touchent, mais une portion s'échappe sous forme rayonnante, à-peu-près comme la lumière s'échappe de la flamme; et ces rayons de calorique se répandant de toutes parts, les uns vont tomber sur des corps qui les arrêtent et les absorbent en partie, les autres s'élèvent vers le zénith, traversent toute l'épaisseur de l'atmosphère et vont se *perdre* dans le vide du ciel. Il y en a sans doute qui vont tomber sur le soleil et sur les corps célestes, comme il arrive aussi à la lumière d'une bougie de se répandre jusqu'aux astres. Ce qui est vrai d'un corps suspendu dans l'air est vrai pareillement du globe entier de la terre, suspendu au milieu de l'espace. Ainsi, la terre se refroidit: à chaque instant, l'atmosphère et tous les corps terrestres qui sont exposés à l'aspect du ciel perdent de leur calorique par le rayonnement. Il faut donc qu'il y ait des sources de chaleur qui réparent à chaque instant les pertes que fait la terre, et qui puissent maintenir sur sa surface cette température moyenne dont l'intensité est une condition nécessaire des phénomènes de la végétation et des fonctions de la vie.

Nous verrons qu'il y a trois sources de chaleur pour compenser le refroidissement que la terre éprouve, et pour maintenir d'une manière à-peu-près permanente l'équilibre des températures terrestres.

La première est une chaleur primitive qui règne encore à de grandes profondeurs, et qui se dissipe peu-à-peu; elle entretient les parties centrales de la terre à une chaleur sans doute plus grande que celle du fer fondu, mais elle ne contribue que dans une faible proportion aux températures de la surface.

La seconde est la chaleur solaire, dont nous donnerons la mesure dans les Élémens de Météorologie: nous verrons que tout le calorique que le soleil répand sur la terre dans le cours d'une année est capable de fondre une certaine quantité de glace que nous sommes parvenus à déterminer par des moyens simples et rigoureux.

La troisième source de chaleur est celle qui résulte des actions mécaniques et chimiques qui s'exercent sur la matière. Le simple contact des corps dégage de la chaleur : la compression, le frottement, la percussion, et tous les changemens mécaniques que peuvent éprouver les molécules matérielles dégagent pareillement de la chaleur ou du froid. Enfin les combinaisons chimiques, soit les combinaisons naturelles qui accompagnent la naissance, le développement et la décomposition des êtres, soit les combinaisons accidentelles qui sont des produits de l'art, sont autant de phénomènes de production de chaleur ou de froid dont il importe de connaître les lois.

PREMIÈRE PARTIE

Changemens de volume et changemens d'état des corps.

PREMIÈRE SECTION.

Changemens de volume.

CHAPITRE PREMIER.

DILATATION.

126. *Construction du thermomètre à mercure.* — La construction du thermomètre à mercure se réduit à un petit nombre d'opérations très-simples : il suffit de préparer le tube, d'introduire le liquide, de fermer le thermomètre et de le graduer.

Les tubes de thermomètre doivent avoir un diamètre intérieur qui soit partout le même, afin que des longueurs égales correspondent à des volumes égaux. Pour s'assurer de cette condition, on fait passer, dans l'intérieur du tube que l'on veut employer, une petite colonne de mercure de 1 ou 2 centimètres de longueur ; ensuite, par une légère pression que l'on peut exercer avec une vessie de gomme élastique, on fait courir cette colonne d'un côté ou de l'autre, jusqu'à ce qu'elle ait parcouru toute l'étendue du tube en présence d'une échelle divisée (*fig.* 181). Si, dans chaque position, elle occupe la même longueur, on est très-sûr que le tube est cylindrique, et, pour l'employer à la construction d'un thermomètre, il ne reste plus qu'à y souffler une boule (*fig.* 176),

ou à y souder un réservoir cylindrique. Si, au contraire, elle occupe des longueurs inégales, il est nécessaire de calibrer le tube, c'est-à-dire de marquer sur toute sa longueur les intervalles plus ou moins grands qui correspondent aux diverses positions de la colonne.

Pour introduire le liquide, on chauffe le réservoir afin d'en dilater l'air, et ensuite on plonge rapidement l'extrémité du tube dans un bain de mercure. Le refroidissement qui a lieu diminue l'élasticité de l'air intérieur, et la pression atmosphérique force le liquide à monter de plus en plus; il suffit qu'il en arrive seulement quelques gouttes dans le réservoir (*fig.* 178). Alors, retournant l'appareil pour le chauffer de nouveau jusqu'à l'ébullition du liquide, les vapeurs de mercure en remplissent bientôt toute la capacité; l'air est complètement chassé, et cette fois, en plongeant très-vite l'extrémité du tube dans le bain de mercure, on est presque assuré qu'il se remplira complètement.

Avant de fermer le thermomètre, on en *règle la course*, c'est-à-dire que l'on fait sortir ou rentrer du liquide jusqu'à ce que le sommet de la colonne corresponde à-peu-près à la hauteur que l'on veut choisir pour la température moyenne; ensuite, on ferme à la lampe l'extrémité du tube. Cette opération se fait de deux manières : 1° en faisant le vide au-dessus de la colonne thermométrique; 2° en y laissant de l'air.

Dans le premier cas, on commence par effiler l'extrémité du tube, et, après cela, on chauffe la boule sur des charbons jusqu'au point de faire sortir une petite goutte de liquide. A cet instant même, on dirige le dard du chalumeau (*fig.* 177) sur l'extrémité du bec effilé du tube; le verre se fond, et le tube est fermé : il ne reste plus qu'à l'arrondir, en le présentant au dard de la lampe, après que la colonne s'est retirée par le refroidissement.

Dans le second cas, le thermomètre étant à la température *ambiante*, c'est-à-dire à la température de l'air environnant, on présente l'extrémité du tube au dard de la lampe, et on

la ferme hermétiquement ; ensuite, on la maintient rouge et à-peu-près en état de liquéfaction pendant quelques instans ; et alors, chauffant rapidement le réservoir, soit avec la main soit avec une lampe, la colonne monte, l'air est repoussé, et, par la pression qu'il exerce au sommet du tube sur le verre fondu, il forme une espèce de réservoir qui est plus ou moins grand, suivant que l'air y est refoulé avec plus ou moins de force (*fig.* 179). Ce réservoir supérieur est presque toujours nécessaire lorsqu'on laisse de l'air dans l'appareil.

La *graduation* du thermomètre consiste à marquer les *deux points fixes*, et à diviser en parties égales l'intervalle qui les sépare. Les points fixes qui sont généralement adoptés sont celui de la glace fondante et celui de l'eau bouillante. Pour marquer le point de la glace fondante, on plonge dans un vase rempli de glace pilée (*fig.* 179) le réservoir du thermomètre et toute la partie de la tige dans laquelle il se trouve du liquide. La température ambiante étant plus haute que 0, la glace fond peu-à-peu, et toute la masse se maintient à la température fixe de la glace fondante. Après quelques instans, le thermomètre a pris cette température ; il reste parfaitement stationnaire, et l'on marque le point précis où il se trouve ; on le marque sur le tube d'abord à l'encre, et ensuite on y fait un trait au diamant : c'est le 0 ou le point de départ de notre *échelle thermométrique*.

Pour marquer le point de l'ébullition, on prend un vase à long col (*fig.* 180), dans lequel on fait bouillir de *l'eau distillée*; après quelques instans d'ébullition, la vapeur en a échauffé également toutes les parties, et elle s'échappe par les ouvertures latérales ; alors, le thermomètre est enveloppé de toutes parts d'un bain de vapeur dont la température est partout la même et partout égale à la température de la première couche d'eau bouillante. Bientôt la colonne arrive à un point fixe qu'elle ne peut plus dépasser ; c'est le point d'ébullition : on le marque d'abord à l'encre, et ensuite au diamant. Si, au moment de l'expérience, la hauteur du baro-

mètre était sensiblement différente de 760^{mm}, il faudrait faire une correction dont nous donnerons la valeur en parlant de l'ébullition.

L'intervalle des deux points de la glace fondante et de l'eau bouillante est divisé en 100 degrés ou en 100 parties d'égale capacité; les divisions sont continuées au-dessus et au-dessous de ces points, et leur ensemble forme l'*échelle thermométrique*.

Tous les thermomètres à mercure, construits d'après ces principes, sont des instrumens *comparables*, c'est-à-dire qu'ils marchent ensemble et indiquent en même temps le même nombre de degrés. En effet, deux volumes d'un même corps étant pris à 0, si on les porte à une autre température, de telle sorte que l'un d'eux se dilate, par exemple, de la millième partie de son volume à 0, l'autre se dilatera aussi de la millième partie de son volume à 0; par conséquent, deux thermomètres à mercure doivent marquer en même temps 1°, 2°, 3°, etc., parce qu'ils doivent prendre en même temps le centième, les 2 centièmes, les 3 centièmes, etc., de l'accroissement de volume qu'ils sont susceptibles de prendre en passant de 0 à 100°.

Cependant, ce raisonnement n'est vrai qu'en supposant le mercure contenu dans des vases ou dans des enveloppes solides de même nature : car, dans les thermomètres, ce n'est pas la *dilatation absolue* du mercure que l'on observe, mais sa *dilatation apparente*, c'est-à-dire la différence qui existe entre l'accroissement de volume du mercure et l'accroissement de capacité de l'enveloppe qui le contient. Si le verre se dilatait autant que le mercure, le thermomètre resterait stationnaire à toutes les températures, et même, si l'enveloppe du verre se dilatait plus que le liquide qu'elle contient, les augmentations de chaleur feraient baisser le thermomètre au lieu de le faire monter. Pour que les thermomètres soient rigoureusement comparables, il faut donc que leurs enveloppes soient également dilatables.

On peut construire des thermomètres à mercure qui marquent jusqu'à 350 degrés, mais il est impossible de les faire aller plus loin, parce que cette température est voisine du point d'ébullition du mercure. Au-dessous de 0, le thermomètre à mercure ne donne des indications justes que jusqu'à — 30 ou — 35°; car il approche alors de son point de congélation, qui est vers — 40, et, près du changement d'état, tous les corps éprouvent des modifications brusques.

Pour les recherches, et même pour les observations auxquelles on veut donner quelque exactitude, il convient d'employer des thermomètres qui n'aient que 15 ou 20 degrés de course : l'un marquant, par exemple, les températures depuis + 10 à — 5; un autre de — 5 à — 20; un autre de + 10 à + 25, etc.; alors, les réservoirs ne contiennent que très-peu de mercure, les tubes sont d'un diamètre intérieur excessivement fin, et chaque degré occupe une grande longueur. Ces thermomètres ont le double avantage de prendre rapidement la température, et de l'indiquer avec une grande précision. Pour les graduer, il est nécessaire d'avoir un *thermomètre-étalon*, c'est-à-dire un thermomètre gradué à la glace fondante et à l'eau bouillante, et de l'exactitude duquel on soit parfaitement assuré.

On a observé qu'en général le 0 des thermomètres se déplace avec le temps, comme si le réservoir devenait plus petit; il ne faut pas négliger, par conséquent, de vérifier ce point de temps à autre.

Le thermomètre de Réaumur qui est encore en usage en France, et le thermomètre de Fahrenheit qui est exclusivement adopté en Angleterre, se divisent autrement que le thermomètre centigrade.

Le therm. de Réaumur marque 0 à la glace et 80° à l'ébullition.
Le therm. de Fahrenheit marque 32 à la glace, 212 à l'ébullition.

Ainsi, en multipliant les degrés de Réaumur par $\frac{5}{4}$, on les transforme en degrés centigrades, et, réciproquement, en

multipliant les degrés centigrades par $\frac{4}{5}$, on les transforme en degrés de Réaumur; pareillement, une température étant donnée en degrés de Fahrenheit, il suffit d'en retrancher 32 et de multiplier le reste pour $\frac{5}{9}$ pour la transformer en température centigrade.

127. *Formule de dilatation.* La *dilatation linéaire* d'un corps est le rapport qui existe entre son allongement et sa longueur à zéro, quand sa température s'élève de 0 à 1°. Ainsi, en désignant par l la longueur d'une barre de métal à la température 0, par b l'allongement qu'elle éprouve en passant de 0 à 1°, et par n sa dilatation linéaire, on a la relation

$$n = \frac{b}{l} \text{ ou } nl = b.$$

La valeur numérique de n pour chaque substance s'appelle aussi le *coefficient de dilatation* de cette substance.

Pour la plupart des corps, l'expérience apprend, comme nous le verrons tout-à-l'heure, que la dilatation est uniforme entre 0 et 100°, c'est-à-dire qu'entre ces limites l'allongement est proportionnel à l'élevation de température; ainsi, en désignant par l' la longueur de la barre à la température t, on aurait :

$$l' = l + tb, \text{ ou } l' = l + ntl, \text{ ou } l' = l(1 + nt).$$

Telle est la relation qui existe entre la dilatation linéaire, la longueur à 0, la longueur à la température t, et la température t elle-même; de telle sorte, que trois de ces quantités étant connues, on peut aisément trouver la quatrième.

En désignant par l'' la longueur correspondante à la température t', on aurait pareillement :

$$l'' = l(1 + nt');$$

d'où l'on tire :

$$l'' = l'\left(\frac{1 + nt'}{1 + nt}\right),$$

ou, approximativement, $l'' = l'(1 + n(t' - t))$,

en négligeant le carré de n, qui est toujours très-petit par rapport à n, parce que la dilatation linéaire est en général une fraction extrêmement petite.

Cette dernière formule sert à trouver la longueur à une température quelconque, lorsqu'on connaît la longueur pour une autre température et la dilatation linéaire.

Quand la dilatation cesse d'être uniforme, la dilatation linéaire cesse d'être constante; elle devient variable avec la température, et l'on cherche alors la *dilatation linéaire moyenne*, ou le *coefficient moyen de dilatation*, pour la température que l'on considère. Ce coefficient est le rapport de l'allongement total à la longueur à 0, divisé par l'intervalle de température. Ainsi, de 0 à 300°, la dilatation totale du verre étant de $\frac{1}{329}$, le coefficient moyen de dilatation du verre pour 300° est de $\frac{1}{329 \times 300}$ ou $\frac{1}{98700}$

La *dilatation cubique* d'un corps est le rapport qui existe entre son augmentation de volume et son volume à 0, quand sa température s'élève de 0 à 1°. Ainsi, en désignant par v le volume d'un corps à la température 0, par a l'augmentation de volume qu'il éprouve en passant de 0 à 1°, et par m sa dilatation cubique, on a la relation

$$m = \frac{a}{v}.$$

En admettant l'uniformité de dilatation et en désignant par v' et v'' les volumes correspondant aux températures t et t', on aura, pour les volumes et la dilatation cubique, les deux relations

$$v' = v\,(1 + mt) \text{ et } v'' = v'\,(1 + m\,(t' - t)),$$

relations analogues à celles que nous venons de trouver pour les longueurs et pour les dilatations linéaires.

Les dilatations cubiques moyennes s'évaluent aussi de la même manière.

De plus, il est facile de voir que, pour chaque corps, la dilatation cubique est triple de la dilatation linéaire. En effet, les corps se dilatant également dans toutes les dimensions, si l'on représente par l la longueur de l'arête d'un cube à la température 0, et par n la dilatation linéaire de sa substance, chaque arête deviendra $l(1+n)$ à la température de 1°, et le volume dilaté du cube sera

$$l^3(1+n)^3 \text{ ou } l^3(1+3n+3n^2+n^3) \text{ ou } l^3(1+3n),$$

parce que l'on peut négliger les termes où n est au carré et au cube; l'accroissement de volume sera donc $l^3 . 3n$, et l'accroissement de volume divisé par le volume à 0 ou la dilatation cubique m, sera

$$m = \frac{l^3 . 3n}{l^3} = 3n.$$

Il suffira donc de chercher l'une de ces quantités pour avoir l'autre.

128. *Dilatation des corps solides.* Les appareils qui ont été employés avec le plus de succès pour déterminer la dilatation des corps solides, ne pouvant guère s'appliquer à des températures qui dépassent 250 ou 300°, j'ai essayé de combiner un appareil qui ne présentât pas cet inconvénient, et qui pût servir en même temps à comparer les longueurs du mètre ou des autres mesures linéaires pour apprécier avec exactitude leurs plus petites différences. Cet appareil, qui a été construit par M. Gambey, est représenté dans les figures 183, 184, 185 et 186. La figure 185 sert seulement à expliquer le principe sur lequel il repose : concevons en effet que sur une forte règle de fer f on adapte une alidade ab de 11 ou 12 décimètres de longueur, mobile autour du centre a et portant une lunette g d'un très-court foyer; concevons qu'une seconde lunette h fixée sur la même règle f, aux deux points c et d, laisse passer l'alidade ab dans cet intervalle sans en gêner les mouvemens : il est évident que, si une règle mn est

placée devant les lunettes de manière que ses points m et n tombent sous les fils croisés dont elles sont munies, et qu'elle éprouve un allongement mm', le point n restant fixe, il faudra faire tourner l'alidade ab d'une certaine quantité pour que le point m' soit sous le fil de la lunette mobile ; il faudra donc que l'extrémité b de l'alidade parcoure un certain nombre vv' des divisions qui sont tracées sur la règle de fer. Alors, si l'on connaît, une fois pour toutes, le rapport des bras de levier am et ab, il sera facile de déterminer mm' au moyen du nombre des divisions vv', puisqu'on aura

$$\frac{mm'}{vv'} = \frac{am}{ab}.$$

Tout se réduit donc à déterminer avec soin le rapport des bras de levier et à déterminer avec exactitude le nombre des divisions parcourues par le 0 de l'alidade. Il suffit pour cela de placer en m, au-devant de la lunette mobile et perpendiculairement à son axe, une petite pièce de métal sur laquelle on a tracé avec précaution quatre ou cinq millimètres très-exacts; alors, en faisant parcourir à la lunette mobile chacune de ces divisions, l'on observe le nombre des millimètres que l'extrémité de l'alidade parcourt sur la division vv'. Dans mon appareil la longueur ab est triple de la longueur am; mais, au moyen d'une lunette micrométrique fixe qui sert à lire les divisions de b qui passent sous le fil, on peut très-sûrement estimer $\frac{1}{660}$ de millimètre, et par conséquent mesurer avec certitude un allongement de $\frac{1}{1980}$ de millimètres qui a lieu en m, ou environ un deux millièmes de millimètre. On conçoit pareillement que, si l'on présente au-devant des lunettes deux mesures de longueur qui aient entre elles quelques différences, on pourra mesurer cette différence à près de $\frac{1}{2000}$ de millimètre.

La figure 186 représente l'appareil avec ses principaux détails d'exécution.

f' est une plaque de fonte armée de trois pointes mousses en acier, sur lesquelles repose tout l'appareil; cette plaque

repose elle-même sur une sorte d'établi en bois très-solide.

f est la règle de fer en forme de *t*; elle est carrée, de 45 millimètres de côté, et de 12 décimètres de longueur; elle a trois sillons profonds et angulaires, par lesquels elle repose sur les pointes de la plaque de fonte; ainsi, elle ne peut être ni faussée ni courbée par la dilatation.

ab est l'alidade : elle est de laiton et porte une forte nervure qui l'empêche de fléchir et de se déjeter.

x et *x'* sont deux galets qui sont liés à l'extrémité *b* de l'alidade et qui reposent sur la règle de fer; de cette manière l'alidade est parfaitement libre dans sa dilatation et dans ses mouvemens.

vv' est la division de l'alidade; cette division est tracée sur argent en traits déliés, distans de un demi-millimètre environ.

y est la lunette micrométique, elle est portée sur une pièce qui est adaptée à vis contre l'extrémité de la règle de fer.

z est la tête d'une vis micrométrique qui fait mouvoir les fils croisés de la lunette *y* : elle est divisée en cent parties de chacune deux millimètres, et il faut 330 divisions pour déplacer les fils de $\frac{1}{2}$ millimètre; on voit donc que, sans fractionner ces divisions, l'on peut estimer $\frac{1}{660}$ de millimètre sur l'extrémité *b*, ce qui correspond à $\frac{1}{1980}$ de millimètre au point de vue de la lunette *y*.

r est une vis-de-rappel qui sert à imprimer à l'alidade les mouvemens convenables.

Pour employer cet appareil à la mesure des dilatations au-dessous de 300°, on se sert d'une caisse en cuivre représentée (*fig.* 184). On la dispose sur un fourneau convenable, on la remplit d'huile fixe, et on la chauffe en agitant sans cesse le liquide et en le maintenant à une température fixe pendant un temps suffisant. Les règles *mn* que l'on veut soumettre à l'observation sont disposées sur un support en fer *p*, qui repose sur les bords de la chaudière, où sa position est réglée par des systèmes de vis (*fig.* 183); les

extrémités de la règle *mn* se présentent vis-à-vis certaines ouvertures latérales fermées avec des verres parallèles qui sont simplement pressées contre la paroi de la chaudière; on peut aisément ramener pour chaque observation l'extrémité *n* de la règle sous le fil de la lunette fixe, tandis que l'on suit avec la lunette mobile les mouvemens de l'extrémité *m*, au moyen de la vis de rappel *r*.

Pour observer les dilatations dans les hautes températures, on dispose les règles sur un autre support en fer, dans un fourneau en briques où l'on fait passer de l'air chaud ou même de la flamme. Ce fourneau porte, vis-à-vis les lunettes, de petites ouvertures que l'on ouvre à l'instant de l'expérience, et, si la température est inférieure au rouge, on éclaire artificiellement les points sur lesquels visent les lunettes : nous verrons ailleurs comment l'on observe en même temps les températures correspondantes (*voy.* la 2e partie du calorique).

On conçoit combien il est facile, pendant les expériences, de garantir l'appareil des variations de température qui changeraient la distance de la lunette fixe au centre de rotation de la lunette mobile.

MM. Dulong et Petit ont employé, pour déterminer la dilatation des corps solides, un autre moyen qui repose sur la dilatation absolue du mercure dont nous parlerons tout à l'heure; ayant ainsi déterminé la dilatation du verre et du fer, ils se sont servis, pour arriver à la dilatation des autres corps, du pyromètre imaginé par Borda à l'occasion de la mesure de la méridienne. Ce pyromètre est représenté dans la figure 182 : il se compose de deux règles de métal, posées l'une sur l'autre dans toute leur longueur, et réunies d'une manière invariable à l'une de leurs extrémités seulement; chaque règle porte, à son autre extrémité, une tige de laiton qui s'élève d'abord verticalement, et se recourbe ensuite horizontalement. Les branches horizontales de ces deux pièces additionnelles peuvent glisser l'une sur l'autre, quand les

deux règles s'allongent inégalement, et sur la ligne où elles se joignent : chacune d'elles est divisée en parties égales très-petites, mais de manière à former un *Nonius* ou un *Vernier*, c'est-à-dire que 20 divisions de l'une sont, par exemple, équivalentes à 19 divisions de l'autre ; celle-ci portant, je suppose, des cinquièmes de millimètre, on pourra, par la coïncidence des divisions, estimer des vingtièmes de cinquièmes ou des centièmes de millimètre. Cette coïncidence s'observe à la loupe, comme dans les verniers ordinaires. Les règles de MM. Dulong et Petit avaient 12 décimètres de longueur, 25 millimètres de largeur, et 4 millimètres d'épaisseur. Une différence de température de 1° produisait un déplacement correspondant à-peu-près à une partie du vernier. Le pyromètre étant porté, par exemple, de la température 0 à la température de 100°, les deux règles s'allongeaient inégalement : la pièce additionnelle de la plus dilatable glissait sur la pièce additionnelle de l'autre, par exemple, de 100 parties du vernier, qui formaient une longueur absolue de 1 millimètre. Connaissant ainsi la différence des dilatations linéaires des deux règles ; connaissant d'ailleurs la dilatation linéaire de l'une d'elles, et sa longueur primitive, il était facile d'en déduire la dilatation linéaire de l'autre.

Les dilatations linéaires des corps solides étant connues, il suffit de la tripler pour voir la dilatation cubique.

Les dilatations des vases de différentes formes se déterminent par ce principe, que l'augmentation de capacité d'un vase par la chaleur est égale à l'augmentation que prendrait un corps solide de même substance et capable de remplir exactement le vase ; ainsi, la capacité d'un vase de verre étant, par exemple, de 150 centimètres cubes à 0, sa capacité à 100° sera $150\,(1 + 100\,a)$, a étant la dilatation cubique du verre, qui est de 0,00002584.

Le tableau suivant contient les résultats des principales expériences qui ont été faites sur ce sujet jusqu'à la température de 300°.

Tableau des dilatations linéaires des solides.

DÉSIGNATION des SUBSTANCES.	INTERVALLE de température.	DILATATIONS EN FRACTIONS décimales.	DILATATIONS EN FRACTIONS vulgaires.
Suivant MM. Lavoisier et Laplace.			
Flint-glass anglais.....	0 à 100°	0,00081166	1/1248
Platine (selon Borda).....	» »	0,00085655	1/1167
Verre de France avec plomb...	» »	0,00087199	1/1147
Tube de verre sans plomb.....	» »	0,00087572	1/1142
Idem.....	» »	0,00089694	1/1115
Idem.....	» »	0,00089760	1/1114
Idem.....	» »	0,00091750	1/1090
Verre de Saint-Gobain.....	» »	0,00089089	1/1122
Acier non trempé	» »	0,00107880	1/927
Idem.....	» »	0,00107915	1/927
Idem.....	» »	0,00107960	1/926
Acier trempé jaune, recuit à 65°.	» »	0,00123956	1/807
Fer doux forgé.....	» »	0,00122045	1/819
Fer rond passé à la filière.....	» »	0,00123504	1/812
Or de départ.....	» »	0,00146606	1/682
Or au titre de Paris, recuit. ..	» »	0,00151361	1/661
Idem, non recuit.....	» »	0,00155155	1/645
Cuivre.....	» »	0,00171220	1/584
Idem.....	» »	0,00171733	1/582
Idem.....	» »	0,00172240	1/581
Cuivre jaune ou laiton.....	» »	0,00186670	1/535
Idem.....	» »	0,00187821	1/533
Idem.....	» »	0,00188970	1/529
Argent au titre de Paris.....	» »	0,00190868	1/524
Argent de coupelle.....	» »	0,00190974	1/524
Étain des Indes ou de mélac...	» »	0,00193765	1/516
Étain de Falmouth.....	» »	0,00217298	1/462
Plomb.....	» »	0,00284836	1/351
Suivant Smeaton.			
Verre blanc (tubes de barom.).	0 à 100°	0,00083333	1/1175
Regule martial d'antimoine...	» »	0,00108333	1/923
Acier poule.....	» »	0,00115000	1/870
Acier trempé.....	» »	0,00122500	1/816
Fer.....	» »	0,00125833	1/795
Bismuth.....	» »	0,00139167	1/719
Cuivre rouge battu.....	» »	0,00170000	1/588
Cuivre rouge 8 part., étain 1...	» »	0.00181667	1/550
Cuivre jaune fondu.....	» »	0,00187500	1/533
Cuivre jaune 16 part., étain 1..	» »	0,00190833	1/524

DÉSIGNATION des SUBSTANCES.	INTERVALLE de température.	DILATATIONS EN FRACTIONS décimales.	DILATATIONS EN FRACTIONS vulgaires.
Fil de laiton	0 à 100°	0,00193333	1/517
Métal de miroir de télescope	» »	1,00193333	1/517
Soudure, cuiv. 2 part., zinc 1	» »	0,00205833	1/486
Étain fin	» »	0,00228333	1/438
Étain en grains	» »	0,00248333	1/403
Soudure blanche, étain 1 partie, plomb 2	» »	0,00250533	1/399
Zinc, 8 parties, étain 1, un peu forgé	» »	0,00269167	2/372
Plomb	» »	0,00286667	1/349
Zinc	» »	0,00294167	1/340
Zinc allongé au marteau de 1/12	» »	0,00310833	1/322
Suivant le major-général Roy.			
Verre en tube	0 à 103°	0,00077550	1/1289
Verre en verge solide	» »	0,00080833	1/1237
Fer fondu (Prisme de)	» »	0,00111000	1/901
Acier (verge d')	» »	0,00114450	1/874
Cuivre jaune de Hambourg	» »	0,00185550	1/539
Cuivre jaune angl., en forme de verge	» »	0,00189296	1/528
Cuivre jaune angl., en forme d'angle ou de anal rectang.	» »	0,00189450	1/528
Suivant M. Troughton.			
Platine	0 à 100°	0,00099180	1/1008
Acier	» »	0,00118990	1/840
Fer tiré à la filière	» »	0,00144010	1/694
Cuivre	» »	0,00191880	1/521
Argent	» »	0,00208260	1/480
Suivant M. Wollaston.			
Palladium	0 à 100°	0,00100000	1/1000
Suivant MM. Dulong et Petit.			
Platine	0 à 100°	0,00088420	1/1131
	0 à 300	0,00275482	1/3631
Verre	0 à 100	0,00086133	1/1161
	0 à 200	0,00184502	1/454
	0 à 300	0,00303252	1/329
Fer	0 à 100	0,00118210	1/846
	0 à 300	0,00440528	1/227
Cuivre	0 à 100	0,00171820	1/582
	0 à 300	0,00564972	1/177

La dilatation des corps solides paraît, en général, très-sensiblement uniforme entre 0 et 100°; mais, pour des températures plus hautes, comptées sur le thermomètre à mercure ou sur le thermomètre à air, elle devient irrégulière et toujours croissante.

129. *Application de la dilatation des solides.* — La *puissance de dilatation* d'un corps est égale à la *résistance de compression* dont il est capable. S'il faut un poids de mille kilogrammes pour réduire la longueur d'une barre de fer verticale autant que la réduirait un abaissement de température de 1°, il est évident qu'en la chargeant à sa partie supérieure du poids de mille kilogrammes, et en la chauffant de 1°, la dilatation due à la chaleur compensera la compression due à la charge, et sa longueur restera la même. C'est d'après ce principe que l'on peut juger des efforts prodigieux qu'exercent les corps en se dilatant ou en se contractant. Les liquides étant peu compressibles et très-dilatables, sont, de tous les corps, ceux qui peuvent produire les plus grands effets de cette nature. Parmi les corps solides, le fer et la fonte ont pareillement une grande puissance de dilatation : c'est pour cela que, dans les grands ouvrages où l'on doit mettre bout à bout des barres de fer sur une longueur de plusieurs centaines de mètres, on les ajuste de distance en distance pour que l'extrémité d'une barre puisse s'engager dans l'extrémité de la barre suivante, sans la presser. Dans les tuyaux de conduite, l'ajustement est un peu plus difficile; mais on y parvient cependant avec des lames de plomb, dont on enveloppe l'extrémité du tuyau qui doit s'engager dans l'extrémité plus large du tuyau suivant.

La *puissance de contraction* des solides est égale à la *résistance de traction* qu'ils peuvent opposer. S'il faut un poids de mille kilogrammes pour donner à une barre de fer verticale un allongement égal à celui qu'elle prendrait pour une augmentation de température de 1°, il est évident que, si on la charge à son extrémité inférieure du poids de mille kilo-

grammes, et qu'en même temps on la refroidisse de 1°, la contraction du refroidissement compensera l'allongement de la traction, et la longueur restera la même que si la barre n'était ni refroidie de 1° ni tirée par mille kilogrammes. La tenacité du fer étant très-grande, on peut profiter de cette propriété pour exercer des efforts qui surpasseraient peut-être nos moyens mécaniques. On doit tenir compte de cette double propriété lorsqu'on emploie des matériaux qui sont exposés à de grands changemens de température. Il n'est pas douteux, par exemple, qu'une barre de fer ne se courbe lorsqu'elle s'échauffe, si ses deux extrémités rencontrent des obstacles que l'effort de sa dilatation ne puisse pas repousser; et il n'est pas douteux qu'elle ne se rompe par le refroidissement, si ses extrémités sont fixées à des obstacles que l'effort de la contraction ne puisse pas rapprocher. C'est ainsi que, dans l'opération du moulage, beaucoup de pièces cassent par le refroidissement, lorsque leurs formes et leurs proportions n'ont pas été assez bien combinées pour que le *retrait* s'accomplisse librement.

Pendule compensateur. Nous avons déjà eu occasion de faire remarquer que les horloges et les pendules avancent pendant l'hiver et retardent pendant l'été, par l'effet des contractions et des dilatations qu'éprouve la tige du pendule. Mais l'on est parvenu à corriger ce défaut : les pendules dans lesquels les effets de la dilatation sont ainsi détruits s'appellent *pendules compensateurs.* Le plus simple des appareils de cette espèce est représenté dans la figure 65. Les deux tiges extrêmes sont de fer, les deux tiges moyennes sont de cuivre. Par la dilatation du fer, le centre d'oscillation est abaissé, mais il est relevé par la dilatation du cuivre; et, comme le cuivre est plus dilatable que le fer, on conçoit qu'il suffit de bien proportionner les longueurs des tiges de ces deux métaux pour arriver à une compensation complète.

Lames de compensation. On appelle ainsi un système de

deux lames composées de métaux, inégalement dilatables, soit que ces lames aient été soudées ensemble, soit qu'elles aient été clouées l'une contre l'autre par des clous très rapprochés. Supposons qu'une telle lame soit formée par exemple de zinc et de fer, et qu'elle soit droite à la température de 20°, il est évident qu'au-dessus de 20° elle devra se courber, le zinc étant en dehors parce qu'il s'allonge plus que le fer (*fig.* 188), et qu'au-dessous de 20° elle devra se courber, le zinc en dedans parce qu'il se raccourcit plus que le fer. On a mis à profit cette propriété pour compenser les balanciers des chronomètres et pour donner ainsi aux navigateurs des montres d'une précision qui ne laisse rien à désirer. La figure 193 représente un balancier compensé : on voit que l'effet de la dilatation éloigne du centre les extrémités des rayons *a*, mais en même temps, par l'effet des lames de compensation qui se courbent de plus en plus à mesure que la température s'élève, les extrémités *b* des arcs se rapprochent au contraire du centre, et tout l'artifice consiste à combiner l'effet des lames avec les variations d'élasticité du ressort spiral, pour que les oscillations restent parfaitement isochrones malgré les variations de température.

Thermomètre à cadran (*fig.* 189). — La lame de compensation *f g h* est composée de cuivre et d'acier, elle est fixée en *f*, se recourbe en *g* et se termine en *h*. Autour de l'axe *b* tourne un levier dont le petit bras est sans cesse appuyé contre l'extrémité *h*, et dont le grand bras porte les dents *d d'*. Les mouvemens très-petits que la dilatation peut produire à l'extrémité *h* sont déjà amplifiés dans le même rapport que les bras de levier; ensuite, les dents *d d'* engrènent dans un petit pignon qui tourne autour de l'axe central *c*, et l'aiguille *l i*, tournant autour du même axe, amplifie encore les mouvemens du pignon. On calcule les dimensions pour que les 100° du thermomètre centigrade correspondent à-peu-près à une révolution entière de l'aiguille. Les instrumens de cette espèce doivent être gradués sur le thermomètre à mercure,

de degré en degré, ou au moins de 10° en 10 degrés.

Thermomètre de Breguet. — Cet instrument est le plus délicat et le plus commode de tous les thermomètres métalliques : il se compose d'un petit ruban de métal, de 1 à 2 millimètres de largeur, qui est roulé en spire, comme le représente la figure 187 ; la spire est attachée par son sommet à une pièce de cuivre qui la laisse parfaitement libre et isolée, et, à son extrémité inférieure, elle porte une aiguille horizontale, très-légère, dont la pointe parcourt la circonférence du cercle divisé *c c'*; le cercle est évidé, et repose sur trois pieds très-minces, afin que l'air puisse circuler aisément entre tous les tours de la spire. Une cloche recouvre l'appareil, pour le garantir de l'agitation extérieure.

Le ruban de la spire est composé de trois couches métalliques superposées, argent, or et platine : la couche d'or, qui est au milieu, sert à souder les deux autres. Ce système a d'abord une épaisseur sensible, mais on le lamine jusqu'à le réduire à une épaisseur totale de $\frac{1}{60}$ de millimètre : on peut juger par-là de la masse excessivement petite de l'instrument, et par conséquent de la rapidité avec laquelle il prend la température de l'air qui le touche.

Par l'inégale dilatation du platine et de l'argent, la spire se tord ou se détord, quand la température s'élève ou s'abaisse, et l'aiguille marche pour obéir à ces mouvemens. On gradue cet instrument en comparant sa marche à celle d'un thermomètre très sensible.

130. *Dilatation des liquides.* — On distingue dans les liquides la *dilatation apparente* et la *dilatation absolue* : la dilatation apparente est celle que paraît prendre le liquide dans le vase qui le contient ; la dilatation absolue est celle que prendrait le liquide dans un vase qui n'éprouverait lui-même aucune dilatation.

MM. Dulong et Petit ont déterminé la *dilatation absolue du mercure* au moyen d'un appareil très-simple qui est représenté dans la figure 190, et qui repose sur ce principe

d'hydrostatique que les hauteurs des colonnes liquides en équilibre sont en raison inverse de leurs densités.

a t et *a't'* sont deux tubes verticaux, communiquant par le tube horizontal *tt'*. On les remplit de mercure jusqu'à la hauteur *nn'* : l'action capillaire est nulle à cause de la grandeur des diamètres, et l'égalité des pressions s'établit parfaitement quoique le tube *tt'* soit très-étroit. Cet appareil repose sur une règle de fer *ff'*, qui repose elle-même sur une forte table en bois que l'on met de niveau par le moyen des vis calantes *vv'*. Deux montans de fer *m* et *m'*, portant des anneaux à clavette *c* et *c'*, maintiennent les tubes dans une position bien verticale. Le montant *m* est terminé par un arc de fer, dont l'extrémité *r* doit servir de repère.

L'une des branches est maintenue à la température 0, l'autre est portée successivement à différentes températures; et tout se réduit, dans ces recherches, à mesurer exactement les hauteurs inégales des deux colonnes et la température de la colonne dilatée.

Les hauteurs des colonnes au-dessus de l'axe du tube *tt'* se déterminent par un instrument particulier, représenté figures 201, 202 et 203, et que l'on peut appeler *kathétomètre* parce qu'il sert à mesurer toutes les hauteurs linéaires verticales; il nous servira surtout pour la dilatation des gaz. Le kathétomètre se compose d'un pied à trois vis calantes portant un axe vertical très-solide; sur cet axe est ajusté un manchon *a* qui tourne librement et sans jeu; une règle divisée *bb'* se trouve liée au manchon pour tourner avec lui. Cette règle est rendue inflexible au moyen de la nervure *c*, et une lunette horizontale *d*, portant son niveau *e*, ses vis de réglage et ses vis de pression, peut se mouvoir de haut en bas et de bas en haut sur toute sa longueur *bb'*; le support de la lunette est muni d'un nonius qui parcourt les divisions de la règle et qui permet d'estimer aisément les 20es ou même les 30es de millimètre. Pour régler l'instrument, la lunette se met d'abord horizontale au moyen de son niveau, et l'on

tourne ensuite les vis calantes du pied jusqu'à ce que le niveau reste parfaitement immobile pendant qu'on fait faire à la règle une révolution entière autour de l'axe de rotation.

Pour les expériences dont il s'agit, le kathétomètre se dispose, à une certaine distance, de manière que les axes des tubes *at* et *a't'* et le repère *r* se trouvent successivement au point de vue lorsqu'on fait tourner la lunette autour de l'axe de l'instrument, après l'avoir mise à la hauteur convenable. Alors on détermine, une fois pour toutes, la hauteur *h* du repère *r* au-dessus de l'axe du tube horizontal *tt'* ; cela fait, on se contente à chaque observation de pointer au repère et de voir ensuite de combien il faut faire descendre ou monter la lunette pour viser au sommet des deux colonnes ; s'il a fallu, par exemple, descendre de *z* pour l'une et de *z'* pour l'autre, les hauteurs de ces colonnes seront $h-z$ pour la 1re et $h-z'$ pour la seconde.

Les températures se déterminent de la manière suivante : un cylindre *g* enveloppe le tube *at;* on le remplit de glace pilée, et, au moyen de la petite fenêtre *o*, on peut pointer la lunette au sommet de la colonne. La température du montant *f* restant la même, le repère *r* reste parfaitement fixe. Un cylindre *g'* enveloppe pareillement le tube *a't'*; on le remplit d'une huile fixe qui supporte plus de 300°, sans bouillir. Un fourneau, élevé autour de *g'*, sert à l'échauffer à divers degrés. Deux thermomètres *i* et *i'* servent à marquer la température du bain d'huile, et par conséquent celle du mercure. Le premier *i* est un thermomètre à air, que nous décrirons plus loin (*Voy. les applications*, 2e *vol.*) ; le second *i'* est un thermomètre à mercure (*figure* 191) que l'on peut appeler thermomètre à poids : par la dilatation, le mercure s'échappe dans la petite capsule *s* : on le recueille, on le pèse, on compare son poids à celui du mercure qui est contenu dans le tube à la température 0, et l'on en déduit la température, comptée sur le thermomètre à mercure. Les températures et les hauteurs des colonnes s'observent ra-

pidement, lorsqu'on a fermé toutes les issues du fourneau, et pendant l'état *maximum* qui dure plusieurs instans.

Nous avons vu que la dilatation cubique est donnée par la formule :

$$m = \frac{v' - v}{vt}.$$

Ici nous connaissons t, et nous n'avons besoin de connaître ni v ni v', car les volumes sont en raison inverse des densités, et, dans notre appareil, les densités sont en raison inverse des hauteurs des colonnes; donc, les volumes sont comme les hauteurs des colonnes, et $h-z$ désignant la hauteur de la colonne du tube at qui est à la température 0, $h-z'$ désignant la hauteur de la colonne du tube $a't'$ pour la température t, nous aurons

$$\frac{v'}{v} = \frac{h-z'}{h-z};$$

d'où

$$\frac{v'-v}{v} = \frac{z-z'}{h-z},$$

et par conséquent

$$m = \frac{z-z'}{t\,(h-z)};$$

car $\frac{v'-v}{v}$ est la dilatation correspondante a t^o.

Par ce moyen MM. Dulong et Petit sont parvenus à déterminer la dilatation absolue du mercure jusqu'à 300°, et ils ont trouvé qu'entre 0 et 100° la dilatation pour chaque degré est de $\frac{1}{5550}$; mais, au-dessus de 100°, le coefficient de dilatation augmente lorsqu'on évalue les températures au moyen du thermomètre à air; comme nous allons le voir dans la dilatation des gaz.

Quand le mercure se dilate dans le verre, l'augmentation apparente de volume qu'il éprouve n'est autre chose que sa dilatation absolue, diminuée de l'augmentation de capacité du vase de verre ; ainsi, en général, la dilatation apparente

d'un liquide est égale à sa dilatation absolue, diminuée de la dilatation cubique du vase qui le contient. On peut donc déterminer indirectement la dilatation absolue d'un liquide, car il suffit pour cela d'observer sa dilatation apparente dans un vase dont on connaît d'ailleurs la dilatation cubique. Réciproquement, la dilatation absolue d'un liquide étant connue, il suffit d'observer sa dilatation apparente pour en déduire la dilatation cubique de la matière du vase qui le contient. C'est ainsi que MM. Dulong et Petit sont parvenus à la dilatation du verre, au moyen de la dilatation absolue du mercure.

Les dilatations apparentes des liquides ont été en général déterminées par deux moyens : 1° en observant la marche d'un thermomètre dont la boule est graduée, c'est-à-dire dont la boule a une capacité connue par rapport aux divisions de la tige ; 2° en prenant un matras dont l'extrémité du tube est effilée et recourbée ; on pèse le liquide qu'il contient à 0, on le chauffe en le disposant dans un bain la pointe en dehors ; on laisse sortir tout le liquide qui est chassé par la dilatation, on le pèse de nouveau et l'on connaît ainsi le poids du liquide sorti. En le divisant par le poids du liquide à 0, et par le nombre des degrés dont la température a été élevée, on a évidemment la dilatation cubique.

Tous les liquides, excepté le mercure, ont des dilatations irrégulières, c'est-à-dire que leur coefficient est variable avec la température, même entre 0 et 100°.

M. Gay-Lussac a dressé des tables de dilatation pour l'alcool à différens degrés de l'aréomètre, pour l'éther et le sulfure de carbone.

M. Höllsträsn a cherché à déterminer la dilatation de l'eau de degrés en degrés comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

131. *Dilatation des gaz.* — Les appareils qui ont été employés jusqu'à présent pour déterminer la dilatation des gaz ne pouvant pas supporter un grand degré de chaleur, j'ai es-

sayé de construire un nouvel appareil qui pût servir à la fois depuis les plus basses jusqu'aux plus hautes températures, sans que l'air qu'il contient éprouvât d'autres pressions que la pression atmosphérique ; cet appareil qui m'a servi à déterminer en degrés centigrades toutes les températures jusqu'à la fusion de l'or, peut être appelé *pyromètre à air* : il est représenté dans les figures 194 à 200.

Le pyromètre à air se compose de deux parties distinctes : le *réservoir de chauffe* et le *réservoir de dilatation*. Pour les températures qui ne dépassent pas le rouge sombre, le réservoir de chauffe peut n'être qu'un simple tube de verre (*fig.* 195). Pour les températures plus élevées, le réservoir de chauffe doit être fait de platine battu au marteau (*fig.* 194); dans ce cas, la portion *b c* du tube de communication est aussi de platine: c'est une tige forée dans son axe d'un trou assez petit, et la portion *c d*, qui ne reçoit pas le feu, peut être une tige d'argent soudée à la tige de platine et percée d'un trou pareil.

Le réservoir de dilatation se compose de trois tubes barométriques verticaux et parallèles *r*, *s*, *t*, mastiqués à leur partie inférieure dans un tube de fer *q*, muni d'un robinet *z* (*figure* 197). Les tubes *s* et *t* communiquent toujours entr'eux ; ils communiquent au tube de remplissage *r* quand le robinet est tourné dans sa position n° 1, et ils communiquent au dehors quand il est tourné dans sa position n° 2; dans les positions intermédiaires du robinet, les tubes *s* et *t* ne communiquent ni au dehors, ni avec le tube de remplissage. La clef *z'* sert à tourner le robinet. Le tube de fer *q* porte une embase *q'*, destinée à recevoir un manchon de verre *l* dans lequel on met un liquide pour maintenir les trois tubes à une température déterminée.

Le tube *t* est divisé en capacités égales : on peut facilement tracer au diamant sur toute sa longueur les divisions correspondant au dixième de centimètre cube, et, comme ces divisions sont distantes de plus de deux millimètres, on

peut aisément en mesurer la dixième partie ou les centièmes de centimètre cube. C'est ce tube qui est véritablement le réservoir de dilatation, le reste de l'appareil ne servant qu'à établir l'équilibre de pression, il est par conséquent destiné à recevoir le réservoir de chauffe, qui vient par l'extrémité de son tube de communication s'engager dans une douille de cuivre recourbée, comme on le voit dans la figure 194. Si le réservoir de chauffe est de verre, on le lute avec du mastic ordinaire; s'il est de métal, on le soude à l'étain.

L'appareil étant ainsi disposé, il s'agit de le remplir d'air sec, ou en général du gaz sec que l'on veut soumettre à l'expérience; pour cela on adapte sur la machine pneumatique, par son extrémité *x*, le tube *u* rempli de chlorure de calcium (*fig.* 199), tandis que son autre extrémité *y*, qui est en plomb, vient se mastiquer sur le tube *s* du réservoir de dilatation. Alors, il est facile de voir qu'après avoir fait le vide une première fois, il suffit d'ouvrir le robinet *v* pour remplir l'appareil d'air sec : en répétant ainsi le vide quinze ou vingt fois, on peut être assuré qu'il ne reste plus de trace d'humidité. Lorsqu'on veut remplir l'appareil d'un gaz particulier, il suffit de mettre le tuyau de plomb *u* en communication avec une cloche remplie de ce gaz.

Le tube *r* étant alors rempli de mercure, on ouvre le robinet *z*, et le mercure passe dans les tubes *s* et *t*; si, au moyen de la machine pneumatique, on n'avait pas assez diminué la pression dans les tubes et dans le réservoir de chauffe avant d'ouvrir le robinet *z*, il serait très-facile en donnant un coup de piston de faire sortir une nouvelle quantité d'air du tube *t*. On arrive aussi, sans beaucoup de tâtonnemens, à avoir les tubes *s* et *t* pleins de mercure et le réservoir de chauffe rempli de gaz sec. On supprime alors le tube de plomb, et le tube *s* reçoit directement la pression atmosphérique.

Maintenant, pour procéder aux expériences, pour observer par exemple la dilatation de l'air jusqu'à 100° du ther-

momètre à mercure, on dispose le réservoir de chauffe dans un bain d'eau distillée, représenté figure 192. A mesure que la température s'élève, l'air dilaté passe dans le tube divisé, exerce sa pression sur le mercure, et, pour maintenir au même niveau les deux colonnes des tubes s et t, il faut tourner le robinet pour faire sortir un peu de mercure. En suivant de l'œil le progrès de la dilatation, et en ouvrant le robinet un peu plus ou un peu moins, il n'est pas difficile de maintenir dans les deux tubes l'égalité de niveau à moins de $\frac{1}{2}$ millimètre : réciproquement, si le réservoir de chauffe se refroidit, le niveau du mercure tend à s'élever dans le tube t; mais, en tournant le robinet en sens contraire, on établit la communication entre les deux tubes s et t et le tube de remplissage r, que l'on maintient toujours plein de mercure, et le niveau se rétablit. Cette facilité de rétablir le niveau pendant le refroidissement est très-importante dans les hautes températures.

La figure 200 sert à mieux montrer encore le jeu de l'appareil. Le tube de remplissage y a été supprimé.

Voici maintenant l'usage du pyromètre à air, soit pour déterminer la dilatation de l'air, soit pour mesurer les températures en degrés centigrades et avec une grande exactitude jusqu'à la fusion de l'or.

Désignons par c la capacité à 0 dans laquelle l'air se chauffe, et par z la capacité qui est comprise depuis le point de départ des divisions sur le tube divisé u jusqu'au point u' du tube de communication, où le réservoir commence à se chauffer. Pour trouver les valeurs de c et de z, on pèse le réservoir vide et sec, on le pèse rempli d'eau à une température connue, et la différence de ces deux pesées, corrigée des dilatations, donne la capacité totale du réservoir; ensuite, par des mesures directes des dimensions, soit du tube de communication lui-même, soit de sa douille qui unit le réservoir au tube divisé t, il est facile d'avoir très-exactement les valeurs de c et de z; dans l'un de mes appareils en

platine, $c = 56,73$ centimètres cubes et $z = 2^{cc},64$.

Supposons que le manchon l soit rempli d'eau, sans cesse agitée et maintenue à 0 avec de la glace, que le tube de communication passe dans une rigole remplie de glace pilée, et que le réservoir soit aussi amené à 0°. Dans cet état, au moyen du robinet z, on amène le mercure exactement au même niveau dans les deux tubes s et t, c'est le kathéthomètre (*fig.* 201), qui sert à toutes ces observations.

Soit b le nombre des divisions que l'air occupe dans le tube divisé à partir du 0 de l'échelle, et p la pression barométrique au moment de l'observation :

Le volume d'air à 0 sous la pression p contenu dans l'appareil est alors $c + z + b$, et il est facile de le ramener à ce qu'il serait sous la pression de 760 millimètres ou sous toute autre pression. En représentant par v le volume à 0 sous 760, on aura

$$v = \frac{p}{760}(c + z + b).$$

Cette valeur de v étant une fois connue, elle servira à trouver la valeur b', que l'on aurait observée pour une autre pression p' ; car, on aura

$$b' = \frac{760}{p'}v - (c + z)$$

Désignons maintenant par a le coefficient de dilatation de l'air, et supposons que la portion du réservoir dont la capacité est c soit élevée à la température t, tout le reste de l'appareil conservant sa température 0. L'air dilaté en sortant du réservoir pour venir dans le tube divisé, y prendra aussi la température 0 et y occupera un nombre d de divisions ou de centimètres cubes que l'on déterminera aisément ; car, le niveau étant établi et l'observation étant faite avec le Rathétomètre, on trouvera d' divisions occupées par l'air dans le tube divisé ; et, comme sous la pression quelconque p' à laquelle on fait l'observation il devrait déjà y avoir b' di-

visions lorsque la température du réservoir est à 0, on a évidemment

$$d = d' - b'.$$

Or, si le volume c de l'air qui se chauffe se fût chauffé librement sous la même pression p' du moment de l'observation, il aurait pris un volume $c\,(1 + at)$; par conséquent, le volume du réservoir qui est devenu $c\,(1 + m\,t)$ à cause de la dilatation du verre, plus le volume dilaté de d qui serait $d\,(1 + at)$, doivent reproduire le volume $c\,(1 + at)$. On a donc

$$c\,(1 + at) = (c\,1 + m\,t) + d\,(1 + at),$$

d'où l'on tire

$$a = \frac{cmt + d}{t\,(c - d)},$$

d étant toujours donné par la relation $d = d' - b'$, et b' étant toujours donné par la relation $b' = \frac{760\,v}{p'} - (c + z)$: p' étant la hauteur du baromètre de l'instant où l'on a observé la température t et la valeur de d' ; la hauteur du baromètre doit être réduite à 0.

On trouve ainsi le coefficient moyen de dilatation de l'air de 0 à 50° ou de 0 à 100°. Pour obtenir une plus grande exactitude, on choisit un tube divisé t d'un assez petit diamètre pour que un centimètre cube y occupe une longueur de 30 à 40 millimètres.

Lorsque le coefficient de dilatation de l'air est déterminé entre 0 et 100°, il est facile, en supposant la dilatation de l'air uniforme, de déterminer les marches comparatives du thermomètre à air et du thermomètre à mercure : il suffit pour cela de remplacer le bain d'eau distillé par un bain d'huile, que l'on porte successivement à 150, 200, 250 et 300°, et de faire à chacune de ces températures les observations nécessaires pour avoir les valeurs de d correspondantes ; alors c'est t qui est inconnu dans la formule précé-

dente, et l'on en tire

$$t = \frac{d}{c\,(a - m) - ad}.$$

Il faut seulement connaître la dilatation cubique m du verre, pour la température t comptée sur le thermomètre à air, ou sur le thermomètre à mercure, car cela revient au même à cause de la petitesse de ses variations.

Les résultats que j'ai obtenus de cette manière confirment en général ceux que M. Gay-Lussac avait obtenus entre 0 et 100°, et ceux que MM. Dulong et Petit avaient obtenus depuis 36° au-dessous de 0 jusqu'à 350°, terme de l'ébullition du mercure. Les résultats de M. Gay-Lussac sont les suivans :

Entre 0 et 100°, la dilatation de l'air est uniforme et elle est, pour chaque degré, $\frac{1}{267}$, ou 0,00375 du volume à 0 ; tous les gaz se dilatent uniformément comme l'air, et ont comme lui pour coefficient de dilatation $\frac{1}{267}$ de leur volume à zéro.

Voici les résultats de MM. Dulong et Petit :

Au-dessus de 100°, le thermomètre à mercure marque des températures plus hautes que le thermomètre à air, et les différences vont en croissant à mesure que la température s'élève ; les températures correspondantes, indiquées par ces deux instrumens, sont les suivantes :

Therm. à mercure, 100, 150, 200, 250, 300, 360.
Therm. à air..... 100, 149, 197, 245, 293, 350.

Dans les expériences précédentes qui ont pour but de déterminer exactement le coefficient de dilatation des gaz entre 0 et 100° et la marche comparative du thermomètre à mercure avec les thermomètres à gaz, il est nécessaire de se servir d'un réservoir de verre, parce que j'ai constaté que les réservoirs de platine ont la propriété remarquable de condenser ou d'absorber des volumes plus ou moins grands de certains gaz, et de ne laisser dégager ces volumes absorbés qu'à des températures variables qui sont en général inférieures à 100°.

Ainsi, le coefficient moyen de dilatation entre 0 et 100° serait très-inexact si l'on ne tenait pas compte de cette circonstance; mais, le fait une fois reconnu, il est très-facile de déterminer par l'appreil lui-même quel est dans chaque cas le volume de gaz qui est absorbé, et à quelle température ce gaz se dégage en totalité de manière que le reservoir de platine se comporte ensuite comme un réservoir de verre. En faisant les corrections relatives à ce phénomène singulier, en prenant toutes les précautions que ces recherches délicates exigent, je suis parvenu à estimer directement toutes les températures jusqu'à la fusion de l'or; et ensuite, par d'autres procédés qui seront développés dans la seconde partie de la chaleur, j'ai pu étendre ces déterminations jusqu'à la température de la fusion du fer, c'est-à-dire jusqu'à la température du feu de forge le plus violent.

L'appareil qui donne les températures jusqu'au-dessus de la fusion de l'or, en degrés centigrades, comptés sur le thermomètre à air, est représenté dans la figure 198.

f est un fourneau carré, construit en briques réfractaires et approprié à ce genre d'expériences; c'est-à-dire qu'il est disposé pour que l'on puisse aisément y remettre du charbon et surtout pour que l'on puisse gouverner le feu, soit par la clé qui se trouve au tuyau *t*, soit par le registre qui ferme le cendrier *c*, l'air n'ayant aucune autre issue.

m est une mouffle de fer portée sur de forts barreaux et destinée à recevoir le réservoir de platine : cette mouffle se ferme aux deux bouts par des couvercles de fer; elle prend aisément dans toute son étendue une température uniforme qu'elle communique au réservoir de platine, parce qu'elle est de toutes parts environnée de charbons, et parce que le tirage se fait bien régulièrement au travers des barreaux de la grille de manière à donner partout une combustion à-peu-près également active.

Les choses étant ainsi disposées, on agit comme dans les expériences précédentes, et l'on détermine *t* par la formule :

$$t = \frac{d}{c(a-m)-ad},$$

m étant alors la dilatation cubique du platine. Seulement, pour obtenir d, il y a des corrections à faire, à raison du gaz absorbé, et à raison de la température à laquelle se trouve l'air dans le tube divisé, si l'on ne veut pas s'astreindre à le maintenir à la température 0. Nous indiquerons ces formules dans les applications qui terminent le 2e volume.

Voici les résultats auxquels je suis parvenu pour les différentes nuances de couleur que présentent les corps à partir du rouge naissant.

Rouge naissant	525°
Rouge sombre	700
Cérise naissant	800
Cerise	900
Cerise clair	1000
Orange foncé	1100
Orange clair	1200
Blanc	1300
Blanc suant	1400
Blanc éblouissant	1500

Ces indications ne sont pas aussi vagues qu'elles pourraient le paraître au premier abord : lorsqu'on est parvenu à étudier la marche comparative des nuances et des degrés de chaleur au moyen d'un pyromètre parfaitement exact comme le précédent, il est facile de se convaincre qu'avec un peu d'habitude on ne se trompe pas de 50° sur la véritable température d'un corps dont on peut observer la nuance, sans réflets étrangers. Au reste, la détermination des capacités pour la chaleur et la mesure directe des températures par les courans thermo-électriques, dont on trouvera les détails dans la seconde partie du calorique, feront mieux comprendre le degré d'exactitude avec lequel j'ai pu prolonger enfin l'échelle thermométrique depuis la température de l'ébullition du mercure jusqu'à celle de la fusion du fer.

CHAPITRE II.

De la densité des gaz, des liquides et des solides.

132. Nous avons vu (46) que la pesanteur spécifique ou la densité d'un corps est le rapport de son poids à son volume. L'objet qu'on se propose dans la recherche des densités est moins de pouvoir trouver combien pèse un corps, sous un volume donné, que de pouvoir comparer entre elles les densités de tous les corps différens que nous présente la nature. On prend donc pour unité une densité connue, et l'on cherche combien de fois les autres la contiennent. L'unité que l'on choisit pour les gaz est la densité de l'air atmosphérique, parce que l'air se trouve partout, et que partout il se compose des mêmes élémens chimiques, mélangés dans la même proportion. L'unité que l'on choisit pour les autres corps est la densité de l'eau distillée, parce que l'eau se trouve aussi partout, et qu'il est facile, en la distillant, de la rendre parfaitement pure. Ensuite, le rapport entre la densité de l'air et celle de l'eau donne le moyen d'établir la comparaison entre les densités de tous les corps connus.

133. *Densité des gaz.* — A volume égal, les densités des corps sont entre elles comme leurs poids; ainsi, pour avoir les densités des gaz par rapport à l'air, il suffit de peser un volume d'air et un volume égal de tous les autres gaz, à la même température et sous la même pression. On prend pour cela un ballon de 8 ou 10 litres de capacité (*fig.* 220), que l'on pèse après y avoir fait le vide, et que l'on pèse ensuite après l'avoir rempli successivement d'air sec et des gaz différents dont on veut avoir les densités. Comme il est impossible de faire le vide parfait, on tient

compte, par le calcul, de la petite quantité d'air qui reste; et, comme toutes les pesées ne peuvent se faire dans des circonstances exactement pareilles, il y a de nombreuses corrections à faire pour les variations de température, de pression, et d'humidité de l'air extérieur.

Nous avons rassemblé dans le tableau suivant les densités des gaz et des vapeurs.

Tableau des densités des gaz et des vapeurs.

DÉSIGNATION des FLUIDES ÉLASTIQUES.	DENSITÉS déterminées par expérience.	DENSITÉS calculées.	POIDS de 1 litre à 0° et 760 de pression.	NOMS des Observateurs.
Air	1,0000		1,2991	
Gaz hydriodique	4,4288	4,3399	5,7719	Gay-Lussac.
chloroxi-carbonique	»	3,3990	4,4156	J. Davy.
chlore	2,4216	2,4260	3,2088	Gay et Thénard.
deutoxide de chlore	»	2,3155	3,0081	J. Davy.
sulfureux	2,1930	»	2,8489	H Davy.
cyanogène	1,8064	1,8197	2,3467	Gay-Lussac.
protoxide d'azote	1,5269	1,5269	1,9752	Colin.
acide carbonique	1,5245	»	1,9805	Berzél. et Dulong.
hydro-chlorique	1,2474	1,2474	1,6205	Biot et Arago.
hydro-sulfurique	1,1912	»	1,5475	Gay et Thénard.
oxigène	1,1026	»	4,4323	Berzél. et Dulong.
deutoxide d'azote	1,0388	1,0390	1,3495	Bérard
hydrogène-bi-carburé	»	0,9816	1,2752	Thomson.
azote	0,9757	»	1,2675	Berzél. et Dulong.
oxide de carbone	0,9569	0,9732	1,2431	Cruikshancks.
hydrogène per-phosphore	0,9022	»	»	Thomson.
hydrog. proto-phosphoré	0,8700	»	»	H. Davy.
ammoniacal	0,5967	0,5910	0,7752	Biot et Arago.
hydrogène proto-carburé	»	0,5596	0,7270	Thomson.
hydrogène	0,0688	»	0,0894	Berzél. et Dulong.
Vapeur de perchlorure d'étain	9,200	8,993	11,051	Dumas.
d'iode	8,716	8,612	11,323	id.
de perchlorure de titane	6,856	7,047	8,881	id.
de mercure	6,976	6,978	9,062	id.
de proto-chlorure d'arsenic	6,301	6,297	8,185	id.
de chlorure de silicium	5,939	5,960	7,715	id.
d'éther hydriodique	5,475	»	7,112	Gay-Lussac.
d'essence de térébenthine	5,013	4,211	6,512	id.
de protochl. de phosphore	4,875	4,808	6,353	Dumas.
de chlorure de bore	3,942	4,079	5,121	id.
d'acide fluorique silicé	3,600	3,597	»	id.
d'hydro-bi-carb. de chlore	3,443	3,408	4,473	
nitreuse	»	3,180	4,132	Colin et Robiquet.
d'hydrogène arseniqué	2,695	2,695	3,502	Dumas.
de sulfure de carbone	2,645	»	3,436	Gay-Lussac.
d'éther sulfurique	2,586	2,583	3,395	id.
d'acide fluo-borique	2,312	2,307	»	id.
d'éther hydro-chlorique	2,2190	2,2290	2,8827	Thénard.
d'acide chloro-cyanique	»	2,1228	2,7577	Gay-Lussac.
d'alcool absolu	1,6133	1,6016	2,0958	id.
d'acide hydro-cyanique	0,9476	0,9442	1,2310	id.
d'eau	0,6235	0,6200	0,8100	id.
de carbone		0,4220	0,5482	

Si l'on représente par d la densité d'un gaz à la température 0 sous la pression de 760^{mm}, et par d' la densité du même gaz à la température de t^o sous la pression h, il est très-facile de trouver la relation qui existe entre les deux densités, les deux pressions, et les deux températures. En effet, prenant, par exemple, 1 centimètre cube du gaz dans les premières circonstances, ce centimètre cube deviendra $1+at$, en passant à la température t (a étant le coefficient de dilatation 0,00375), et, en passant de la pression 760 à la pression h, ce volume deviendra :

$$\frac{(1+at)\,760,}{h}$$

puisque les volumes sont en raison inverse des pressions. Or, le poids restant le même, les densités sont en raison inverse des volumes, on a donc,

$$\frac{d'}{d} = \frac{h}{760\,(1+at)}$$

Il en résulte que, pour deux gaz différens, les densités conservent le même rapport à toute température et à toute pression. Ainsi, à la température rouge comme à la température zéro, sous la pression de 100 atmosphères comme sous la pression d'une seule atmosphère, la densité de l'hydrogène, par exemple, sera toujours 0,0688 ou environ $\frac{1}{15}$ de la densité de l'air, soumis aux mêmes circonstances, pourvu toutefois que les lois de compression et de dilatation restent communes aux deux gaz.

Avec les données précédentes, on peut trouver, par un calcul très-simple, la densité d'un mélange gazeux, formé dans des proportions connues en poids ou en volumes. Réciproquement, la densité d'un mélange étant connue, on en peut déduire la densité, le poids ou le volume de l'un de

ses élémens, lorsque toutes les autres choses sont déjà déterminées.

134. *Densité de l'eau distillée.* — Tous les corps changent de volume à chaque instant, par l'influence de la chaleur ; ainsi, à chaque instant, ils changent de densité. Mais, dans la loi de ces variations, l'eau présente une exception remarquable : à partir de 0, lorsqu'on élève sa température, elle se retire sur elle-même au lieu de se dilater, et elle se retire de plus en plus, jusqu'à la température d'environ 4°; ensuite, en la chauffant davantage, elle commence à éprouver une expansion, comme font tous les autres corps, et, dès cet instant, sa dilatation est continuellement croissante jusqu'à l'ébullition. Vers la température de 4°, l'eau éprouve donc un *maximum de contraction*. Ce phénomène est frappant, lorsqu'on l'observe sur un thermomètre à eau dont chaque degré occupe une assez grande étendue. Ce thermomètre descend comme le thermomètre à mercure, lorsqu'on les plonge ensemble dans un bain liquide, qui est, par exemple, à 10°, et que l'on refroidit peu-à-peu ; mais, aux approches du 4e degré, le refroidissement augmentant et le thermomètre à mercure continuant de descendre, on voit le thermomètre à eau qui remonte comme si on le chauffait, et qui remonte ainsi jusqu'à la température de la glace. En poussant le refroidissement plus loin, l'eau du thermomètre se gèle et prend tout-à-coup un accroissement de volume très-considérable ; on peut donc présumer qu'à partir de 4° les molécules liquides commencent à s'écarter l'une de l'autre, et qu'elles se préparent en quelque sorte à prendre les positions respectives qu'elles doivent avoir pour passer à l'état solide. L'eau qui tient en dissolution quelques sels ou d'autres substances étrangères paraît, au moins dans quelques cas, présenter encore les propriétés du maximum de contraction, mais à une température plus basse, le point de congélation étant lui-même abaissé.

Ces phénomènes ne semblent d'abord que des exceptions

fortuites et de peu d'importance, mais nous verrons plus tard qu'ils ont une grande influence sur la distribution de la chaleur dans l'étendue des mers et de tous les continens. C'est par là que, dans les latitudes élevées, les rivières, les lacs et les mers, peuvent rester liquides à une certaine profondeur; c'est par là que les êtres vivans qui peuplent les eaux peuvent se conserver dans toutes les saisons et se perpétuer; c'est par là enfin qu'il s'établit une circulation de chaleur entre les pôles et l'équateur, et une température moyenne qui est plus modérée dans tous les climats.

Le point précis du maximum de contraction, et les différentes densités de l'eau, à diverses températures, ont été l'objet d'un grand nombre de recherches.

On verra dans le tableau suivant les résultats de M. Hällström. Cet observateur trouve le maximum de contraction à 4°,108; mais, en discutant toutes les probabilités des erreurs, il pense que, dans cette détermination difficile, on peut se tromper de 0°,238, en plus ou en moins. Nous adoptons donc avec lui 4°,1 comme étant le nombre qui est probablement le plus exact. Dans le premier tableau, on a pris pour unité la densité à 0, et le volume à 0; dans le second, on a pris pour unité la densité maximum et le volume minimum, c'est-à-dire à 4°,1. C'est par le principe d'Archimède (86) que M. Hällström est parvenu à ces résultats. Le corps plongé qu'il employait était une boule creuse de verre, lestée avec du sable, de manière à être très peu pesante dans l'eau; il la suspendait par un cheveu à une balance hydrostatique très-sensible, et il cherchait les diverses pertes de poids qu'elle éprouvait dans l'eau, à toutes les températures comprises entre 0 et 30°. La dilatation du verre étant déterminée d'avance avec beaucoup de soin, il pouvait calculer pour chaque expérience le volume et le poids de l'eau déplacée, et par conséquent sa densité.

Densités et volumes de l'eau de 0 à 30° centigrades.

Température.	EN PRENANT POUR UNITÉS LA DENSITÉ ET LE VOLUME A 0.		EN PRENANT POUR UNITÉS LA DENSITÉ ET LE VOLUME A 4° 1.	
	Pesanteurs spécifiques.	Volumes.	Pesanteurs spécifiques.	Volumes.
0°	1,0	1,0	0,9998918	1,0001082
1	0,0000466	0,9999536	0,9999382	1,0000617
2	1,0000799	0,9999202	0,9999717	1,0000281
3	1,0001004	0,9998996	0,9999920	1,0000078
4	1,00010817	0,9998918	0,9999995	1,0000002
4,1	1,00010824	0,99989177	1,0	1,0
5	1,0001032	0,9998968	0,9999950	1,0000050
6	1,0000856	0,9999144	0,9999772	1,0000226
7	1,0000555	0,9999445	0,9999472	1,0000527
8	1,0000129	0,9999872	0,9999044	1,0000954
9	0.9999579	1,0000421	0,9998497	1,0001501
10	0,9998906	1,0001094	0,9997825	1,0002200
11	0,9998112	1,0001888	0,9997030	1,0002970
12	0,9997196	1,0002804	0,9996117	1,0003888
13	0,9996160	1,0003841	0,9995080	1,0004924
14	0,9995005	1,0004997	0,9993922	1,0006081
15	0,9993731	1,0006273	0,9992647	1,0007357
16	0,9992340	1,0007666	0,9991260	1,0008747
17	0,9990832	1,0009176	0,9989752	1,0010259
18	0,9989207	1,0010805	0,9988125	1,0011888
19	0,9987468	1,0012548	0,9986387	1,0013631
20	0,9985615	1,0014406	0,9984534	1,0015490
21	0,9983648	1,0016379	0,9982570	1,0017560
22	0,9981569	1,0018465	0,9980489	1,0019549
23	0,9979379	1,0020664	0,9978300	1,0021746
24	0,9977077	1,0022976	0,9976000	1,0024058
25	0,9974666	1,0025398	0,9973587	1,0026483
26	0,9972146	1,0022932	0,9971070	1,0029016
27	0,9969518	1,0030575	0,9968439	1,0031662
28	0,9966783	1,0033328	0,9965704	1,0034414
29	0,9963941	1,0036189	0,9962864	1,0037274
30	0,9960993	1,0039160	0,9959917	1,0040245

135. *Densité des liquides.* — Le principe d'Archimède, servant à comparer entre elles les densités de l'eau à diverses températures, peut servir pareillement à trouver les densités de tous les liquides. Si l'on veut, par exemple, connaître la densité de l'alcool par rapport à celle de l'eau, il suffira de prendre un corps solide plus dense que ces liquides, et d'en faire trois pesées successives :

La première dans l'air;
La seconde dans l'eau;
La troisième dans l'alcool.

La perte de poids que ce corps fait dans l'eau est égale au poids de l'eau qu'il déplace (86), et la perte de poids qu'il fait dans l'alcool est pareillement égale au poids de l'alcool déplacé. Or, la température étant la même, les volumes des liquides déplacés sont aussi les mêmes, donc le rapport de leur poids est égal au rapport de leur densité. Quand les pesées sont faites à des températures différentes, on les réduit, par le calcul, à ce qu'elles seraient à la température 0; mais, pour cela, il faut connaître la loi de dilatation du corps plongé et celle de chaque liquide.

On peut déterminer aussi la densité des liquides par les *pesées directes* d'un même volume de tous ces corps. Pour y parvenir par ce second procédé, on prend un petit flacon de verre mince et léger (*fig.* 223), ayant un bouchon foré et bien rodé qui le ferme d'une manière très-exacte; on le pèse seul, et on le pèse ensuite rempli d'un liquide : la différence des poids est le poids du liquide qu'il contient.

Par exemple : Le flacon seul pèse	100 gr.
Le flacon plein d'eau à 0 pèse.....	200 gr.
Le poids de l'eau contenue dans le flacon est.....	100 gr.
A la même température de 0	
Le flacon seul pèse toujours	100
Le flacon plein d'alcool pèse.....	179
Le poids de l'alcool contenu dans le flacon est.....	79

Les volumes d'eau et d'alcool étant les mêmes, les densités de ces liquides sont entre elles comme les poids; donc,

La densité de l'alcool est	0,79

Lorsque la température n'est pas 0, il faut corriger les résultats des effets que produit la dilatation sur le verre du flacon et sur les liquides que l'on soumet à l'expérience.

136. *Des Aéromètres.*—Les aréomètres sont des flotteurs

qui donnent immédiatement les densités des liquides dans lesquels ils s'enfoncent.

On distingue deux sortes d'aréomètres : les aréomètres à poids variable, et les aréomètres à volume variable.

La figure 215 représente un *aréomètre à poids variable* : *v* est le *volume* ou le *corps* de l'instrument, on le fait en verre ou en métal ; *l* est le *lest*, c'est-à-dire une petite masse de mercure ou de plomb que l'on ajuste à la partie inférieure ; *t* est la *tige*, qui doit être très-déliée ; enfin, *c* est le *chapeau* sur lequel on doit mettre des poids. Quand l'instrument est dans un liquide, il se dispose d'après les conditions d'équilibre des corps flottans ; il se tient debout à cause du lest qui rabaisse son centre de gravité, et il s'enfonce jusqu'à ce qu'il y ait égalité entre son poids et le poids du liquide qu'il déplace ; alors on ajoute des *poids additionnels* sur le chapeau pour *affleurer* l'instrument, c'est-à-dire pour qu'un petit trait *f*, marqué sur la tige, se trouve exactement *à fleur d'eau*. Dans les différens liquides, il faut des poids différens pour produire l'affleurement, et c'est pour cela qu'on l'appelle un aréomètre à poids variable. Soit p le poids de l'instrument, soient a les poids additionnels qu'il faut y ajouter pour l'affleurer dans l'eau à 0, soient a' les poids additionnels qu'il faut y ajouter pour l'affleurer dans l'alcool à 0 : la densité de l'alcool sera à la densité de l'eau, comme $p + a'$ est à $p + a$.

L'aréomètre est d'autant plus sensible que le volume plongé est plus considérable et la tige plus fine.

On conçoit que, pour éviter les calculs, il est possible de former, pour chaque instrument, une table particulière où l'on trouve immédiatement la densité à côté du poids additionnel a'.

L'*aréomètre à volume variable*, représenté (*fig.* 214), a en général moins de volume que l'aréomètre à poids variable : la tige est un petit tube de verre creux ; le corps de l'instrument est un cylindre ou une boule soufflée à l'extrémité du tube ;

et le lest se loge dans le petit appendice en verre qui est au-dessous de la boule ; une bande de papier est soigneusement fixée dans l'intérieur de la tige pour porter les divisions qui marquent les densités. Le poids de cet aréomètre étant constant, il en résulte que les densités des liquides dans lesquels il s'enfonce sont entre elles en raison inverse des volumes plongés. C'est d'après ce principe que l'on fait la graduation, et l'on écrit sur la bande de papier qui sert d'échelle les nombres qui expriment directement les densités des liquides. Ainsi, quand l'aréomètre n'enfonce que jusqu'au nombre 1200, la densité est 1200 ; s'il enfonce jusqu'au nombre 900, la densité est 900, etc. ; la densité de l'eau étant représentée par 1000.

Les *pèse-liqueurs* sont des espèces d'aréomètres, qui ne sont pas gradués pour donner les densités des liqueurs dans lesquelles on les plonge, mais seulement pour donner leur *degré de concentration*. Les *acides* sont *étendus* d'une quantité d'eau plus ou moins grande, les *dissolutions salines* sont plus ou moins *saturées*, les *eaux-de-vie* et les *esprits* sont plus ou moins *riches en alcool* ; et l'on a fait des *pèse-acides*, des *pèse-sels*, des *pèse-esprits*, des *pèse-sirops*, etc. ; pour reconnaître immédiatement les différens états dans lesquels ces liquides peuvent se présenter.

Pèse-acide ou *aréomètre de Beaumé*. — Cet aréomètre a toute l'apparence d'un aréomètre à volume variable, mais il en diffère essentiellement par sa graduation. Au point où il s'arrête dans l'eau pure, on marque 0 ; au point où il s'arrête dans un mélange de 85 parties d'eau et de 15 de sel ordinaire, on marque 15 ; on divise l'intervalle en 15 parties, et l'on continue les divisions au-dessous. Deux dissolutions saturées à divers degrés marqueront évidemment des degrés différens sur l'aréomètre, mais il faudra calculer une table spéciale pour passer des degrés de l'aréomètre aux véritables densités.

Les *pèse-sels* et les *pèse-esprits* sont gradués d'après des

principes analogues ; ils sont donc, comme le *pèse-acide*, des instrumens de commerce plutôt que des instrumens de physique, à moins que l'on n'ait dressé une table des proportions de sel ou d'esprit correspondantes à chaque degré.

L'Alcoomètre centésimal de M. Gay-Lussac est fondé sur d'autres principes. Etant donné des esprits ou des eaux-de-vie, il suffit d'y plonger l'alcoomètre pour connaître à l'instant leur force réelle, leur richesse en alcool, et leur densité. Cet instrument, qui offre d'immenses avantages à la Régie et au Commerce, repose sur des recherches très-précieuses pour la science ; son utilité, déjà démontrée par l'usage, a été sanctionnée par une loi. Il est nécessaire, pour en prendre une juste idée, de consulter *l'Instruction pour l'usage de l'Alcoomètre centésimal* que M. Gay-Lussac a publiée en 1824.

137. *Densité des corps solides.* — On détermine les densités des solides, comme celles des liquides, par trois procédés différens, savoir : au moyen de l'aréomètre, du flacon bouché, ou de la balance hydrostatique.

L'aréomètre que l'on emploie pour déterminer les densités des corps solides est un aréomètre à volume constant, qui s'appelle aréomètre de *Fahrenheit*, ou aréomètre de *Nicholson*, ou aréomètre-balance de *Charles*, suivant quelques légères modifications dans la disposition des pièces. La figure 215 représente l'aréomètre de Charles. Entre le corps *v* de l'instrument et le lest *l*, se trouve un petit panier ou un petit seau d'argent destiné à recevoir les fragmens de matière dont on cherche la densité. Quand les corps sont plus pesans que l'eau, ils doivent exercer une pression de haut en bas, et le panier est accroché par l'anse afin de recevoir cette pression : quand les corps sont spécifiquement plus légers que l'eau, ils doivent exercer une pression de bas en haut, et alors on retourne le panier et on l'accroche par le fond afin qu'il reçoive encore cette pression.

Pour trouver une densité par ce moyen, il faut, avant

tout, connaître le *poids additionnel* qui doit être mis sur le chapeau pour affleurer l'instrument dans l'eau distillée, c'est-à-dire pour le faire enfoncer jusqu'au trait *f* que porte la tige. Supposons qu'à la température 0, le poids additionnel soit de 25 grammes, et, avec cette donnée, cherchons la densité d'un corps quelconque, d'un diamant, par exemple. On met le diamant seul sur le chapeau, et on ajoute successivement des poids, jusqu'à produire l'affleurement : soit $23^{gr.},8$ ce qu'il faut ajouter ; ces poids et le diamant équivalent ensemble à 25 grammes, puisque l'affleurement a lieu. Donc, le diamant pèse $25^{gr.}—23,8$ ou $1^{gr.},2$; tel est son poids dans l'air. Alors, on met le diamant dans le panier d'argent, et aux $23^{gr.},8$ qui sont restés sur le chapeau, on ajoute ce qui est nécessaire pour l'affleurement : $0^{gr.},34$ suffisent pour cet effet ; donc, $0^{gr.},34$ représentent le poids que le diamant perd dans l'eau, et par conséquent le poids d'eau qu'il déplace ou le poids d'un volume d'eau qui est égal au sien. Or, à volume égal, les densités sont entre elles comme les poids ; donc, la densité du diamant est $\frac{120}{34}$ ou 3, 53.

Pour les corps plus légers que l'eau, le procédé est le même, avec cette seule différence, qu'il faut retourner le panier et l'accrocher par le fond ; il n'y a rien à changer ni dans les raisonnemens ni dans les calculs. Lorsque la température n'est pas 0, on fait les corrections.

Le flacon bouché qui sert à la recherche des densités contient environ 2 ou 3 décilitres d'eau (*fig.* 224). L'exactitude de l'expérience dépend en grande partie de la précision avec laquelle le bouchon est travaillé : il faut qu'il soit légèrement conique, bien usé à l'émeri, et parfaitement circulaire dans tout son contour, afin qu'il s'enfonce exactement de la même quantité dans toutes ses positions. Alors, on procède de la manière suivante : on fait trois pesées : la première, pour avoir le poids *p* du corps solide dont on cherche la densité ; la seconde, pour avoir le poids $f + p$ du flacon plein d'eau et du corps solide mis à côté de lui dans le même bassin ;

la troisième, pour avoir le poids f' du flacon et du corps solide mis dans son intérieur et ayant chassé par conséquent un volume d'eau égal au sien. La troisième pesée retranchée de la deuxième, c'est-à-dire $f + p - f'$, donne le poids du volume d'eau chassé; et, puisqu'à volume égal les densités sont comme les poids, la densité du corps est $\frac{p}{f + p - f'}$. Quand la température n'est pas 0, il faut faire les corrections. Ce procédé ne peut s'appliquer qu'à de petites masses ; il importe peu qu'elles soient spécifiquement plus pesantes ou plus légères que l'eau.

Les corps qui sont solubles dans l'eau se pèsent dans l'alcool, dans le mercure, ou dans un autre liquide de densité connue.

Les corps poreux et susceptibles de s'imbiber ont des densités variables suivant le degré d'imbibition : il est difficile de les déterminer avec exactitude.

La balance hydrostatique qui nous a servi à démontrer le principe d'Archimède peut nous servir aussi à trouver les densités des corps solides. Pour l'employer à cet usage, elle n'a besoin d'aucune modification. Le procédé se réduit à faire deux pesées : par la première, on trouve le poids p du corps; par la seconde, on trouve la perte de poids e qu'il éprouve dans l'eau, et cette perte de poids est le poids du volume d'eau déplacé : donc, la densité est $\frac{p}{e}$. Si la température n'est pas 0, on fait les corrections.

Nous avons rassemblé dans le tableau suivant les densités les plus authentiques et auxquelles on est obligé de recourir le plus souvent ; elles ont été déterminées par l'un ou l'autre des trois procédés dont nous venons de parler.

Table de la densité des corps solides à 0 de température, en prenant pour unité la densité de l'eau.

Platine	écroui	23,000
	laminé	22,669
	passé à la filière	21,042
	forgé	20,338
	purifié	19,500
Or	forgé	19,362
	fondu	19,258
Iridium		18,600
Tungstène		17,600
Mercure à 0°		13,598
Plomb fondu		11,352
Palladium		11,300
Rhodium		11,000
Argent fondu		10,474
Bismuth fondu		9,822
Cuivre en fil		8,878
Cadmium		8,694
Molybdène		8,611
Laiton		8,395
Arsenic		8,308
Nickel fondu		8,279
Urane		8,100
Acier non écroui		7,816
Cobalt fondu		7,812
Fer en barre		7.788
Étain fondu		7,291
Fer fondu		7,207
Zinc fondu		6,861
Manganèse		6,850
Antimoine fondu		6,712
Tellure		6,115
Chrôme		5,900
Iode		4,948
Selenium		4,320
Diamans les plus lourds (légèrement colorés en rose)		3,531
— les plus légers		3,501
Flint-glass (anglais)		3,329
Tourmaline (verte)		3,155
Marbre de Paros (chaux carbonatée lassellaire)		2,837
Emeraude verte		2,775
Perle		2,750
Corail		2,680
Cristal de roche pur		2,653
Verre de Saint-Gobain		2,488
Porcelaine de la Chine		2,384
Chaux sulfatée cristallisée		2,311
Porcelaine de Sèvres		2,145
Soufre natif		2,033
Ivoire		1,917
Albâtre		1,874
Anthracite		1,800
Phosphore		1,770
Houille compacte		1,329
Jayet		1,259
Succin		1,078
Sodium		0,972
Potassium		0,865
Bois de hêtre		0,852
Frêne		0,745
If		0,807
Bois d'orme		0,800
Pommier		0,733
Bois d'oranger		0,705
Sapin jaune		0,657
Glace		0,930
Tilleul		0,604
Bois de cyprès		0,598
Bois de cèdre		0,561
Peuplier blanc d'Espagne		0,529
Bois de sassafras		0,482
Peuplier ordinaire		0,383
Liège		0,240

Densité de quelques liquides à 0.

Eau distillée	1,000
Mercure	13,598
Brome	2,966
Acide sulfurique	1,841
Acide nitrique	1,217
Lait	1,030
Eau de mer	1,026
Vin de Bordeaux	0,994
Vin de Bourgogne	0,921
Huile d'olive	0,815
Huile essentielle de térébenthine	0,870
Alcool absolu	0,715

DEUXIÈME SECTION.

Changement d'état des corps.

CHAPITRE PREMIER.

De la Fusion et de la Solidification.

138. *Fusion.* — Il est facile de reconnaître que la *fusion* ou le passage de l'état solide à l'état liquide est un phénomène produit par la chaleur, et qu'aucune autre cause dans la nature ne peut déterminer les corps à ce changement d'état. La glace peut être brisée ou réduite en poussière, elle peut être soumise à toutes les puissances mécaniques et à tous les agens naturels sans cesser d'être un corps solide, à moins que la chaleur ne vienne exercer sur elle son action pour la convertir en eau. Il en est de même de la cire, et, lorsqu'on la voit fondre aux rayons du soleil, on sait bien que c'est par l'effet de la chaleur qu'elle entre en fusion, et non par l'effet de la lumière. Et, si le plomb peut se liquéfier et devenir coulant lorsqu'on le bat sur une enclume à coups redoublés, c'est que la compression et la percussion dégagent de la chaleur tout-à-fait semblable à la chaleur d'un foyer. Ainsi, l'état de solidité ou de fluidité d'un corps est un état relatif, dépendant uniquement de la température à laquelle ce corps est soumis. A une autre distance du soleil, la terre prendrait une autre consistance et un autre aspect : si elle en était plus plus voisine, les métaux seraient pour la plupart dans un état habituel de fusion, et les profondeurs de la mer, au lieu

d'être remplies d'eau, pourraient bien être remplies de substances métalliques liquéfiées : au contraire, si elle en était plus éloignée, la mer serait une masse solide, il n'y aurait plus d'eau coulante et probablement plus de liquide en circulation pour produire les phénomènes organiques de la végétation et de la vie.

La chaleur pénétrant et dilatant tous les corps, il est curieux de chercher si elle peut pareillement les faire passer tous sans exception de l'état solide à l'état liquide. Or, en examinant sous ce point de vue tous les corps solides, on trouve entre eux de grandes différences : il y en a qui sont très-*fusibles*, et qui ne peuvent soutenir des températures même très-basses sans passer à l'état liquide ; tels sont la glace, le phosphore, le soufre, la cire, les corps gras et les résines : il y en a d'autres qui exigent, pour se fondre, des températures un peu plus élevées, comme l'étain, le plomb et divers alliages : enfin, il y en a qui ne peuvent entrer en fusion que par des feux long-temps soutenus et aux plus hautes températures que nous soyons capables de produire; l'or, l'acier, le fer et le platine sont dans ce cas. Les corps qui résistent à ces plus hauts degrés de chaleur sont appelés *infusibles*, *fixes* ou *réfractaires ;* et, comme nos moyens de développer de la chaleur se perfectionnent de jour en jour, le nombre des substances infusibles a été sans cesse en diminuant. Le charbon paraît être le plus réfractaire de tous les corps : cependant, plusieurs physiciens prétendent avoir observé quelques traces de fusion sur les arêtes des diamans qu'ils soumettaient à l'essai. En attendant que ce résultat soit constaté, on peut du moins conclure par analogie qu'il n'y a pas de corps essentiellement infusibles.

Les substances organiques, étant en général composées de carbone et d'élémens gazeux plus ou moins volatils, se décomposent souvent par l'action du feu plutôt que de se liquéfier. Le bois, fortement chauffé, se carbonise et ne se fond pas; il en est de même des fruits, des fleurs et des autres tis-

sus végétaux; il en est de même encore des fibres musculaires et de tous les autres tissus des corps vivans. Toutes ces substances organiques se décomposent par la chaleur : les produits volatils s'exhalent, et il ne reste en dernier résultat que le charbon et les autres élémens fixes qui leur servent de bases.

Plusieurs corps inorganiques se décomposent aussi avant de se fondre, et il a fallu l'esprit inventif de Hall pour démontrer leur fusibilité. Son procédé consiste à chauffer ces corps en les maintenant sous une haute pression, de telle sorte que les élémens les plus volatils ne puissent pas s'exhaler. C'est ainsi que Hall a fait fondre du marbre, sans qu'il se convertît en chaux, et qu'il a démontré pareillement la fusibilité d'un grand nombre de substances volcaniques. Ces résultats sont importans pour discuter l'origine et la formation des diverses couches dont se compose la terre.

139. *Conditions de la fusion.* — Lorsque les corps passent de l'état solide à l'état liquide, ils présentent deux phénomènes très-remarquables (123) : premièrement, ils restent solides jusqu'à ce qu'ils soient arrivés à une certaine température *fixe*, qui est toujours la même pour le même corps, et c'est alors seulement que la fusion peut commencer; secondement, ils restent à la même température pendant toute la durée de la fusion, quelle que soit la quantité de calorique qu'on leur fournisse; d'où il suit qu'ils absorbent ce calorique pour se fondre, et qu'ils le cachent dans leur intérieur sans en laisser rien paraître au-dehors. Ainsi, *la fixité de température*, et *l'absorption du calorique latent* sont les *deux conditions* essentielles de la fusion. Ces phénomènes peuvent être facilement constatés sur les corps très-fusibles, dont la température est accessible au thermomètre à mercure, et ils peuvent l'être encore sur les substances peu fusibles, dont on obtient la température par d'autres moyens. Il y avait près de cent ans que le thermomètre était inventé, que l'on ne connaissait pas encore, d'une ma-

nière certaine, l'invariabilité du point de fusion des corps : on croyait que la glace, par exemple, devait entrer en fusion à diverses températures, suivant la latitude ou l'élévation des lieux où elle était formée. La première condition de la fusion une fois démontrée, il fallut encore plus d'un demi-siècle pour constater l'autre, c'est-à-dire l'absorption du calorique latent; car, ce fut en 1763 que Black mit cette vérité fondamentale dans tout son jour, et qu'il en fit voir les importantes conséquences. Il est visible que la quantité de calorique latent que prend un corps pour se fondre est proportionnelle à la masse de ce corps qui entre en fusion, et nous verrons plus loin qu'à masse égale, des corps différens prennent des quantités de calorique latent très-différentes; ce qui suffit pour imprimer à chaque substance un caractère distinctif pareil à celui qui dérive de la densité ou des autres qualités primitives de la matière.

L'affinité chimique est cependant une cause qui peut faire changer le point de fusion des corps, mais il ne paraît pas qu'elle puisse modifier en rien l'absorption du calorique latent : ainsi, la neige ou la glace pilée étant, par exemple, à la température de — 10° et en contact avec du sel ordinaire aussi à — 10°, la fusion s'opère par la combinaison de ces deux corps, et la température s'abaisse de plus en plus; ce qui est une preuve évidente de l'absorption du calorique latent. C'est là le principe de la formation des *mélanges frigorifiques*, dont nous nous occuperons plus tard. Dans les combinaisons de cette espèce, la limite du froid que l'on peut produire est déterminée par la température à laquelle les élémens de la combinaison cessent d'agir l'un sur l'autre. La neige et le sel, par exemple, n'ayant plus d'action sensible à 18 ou 20° au-dessous de o, il est impossible d'obtenir avec ces élémens un froid plus grand que — 18 ou — 20°, puisque, au-delà de ce terme, ils cessent de se combiner; et, pour approcher de cette limite autant qu'il est possible, il faut que le calorique latent soit exclu-

sivement fourni par la portion des élémens qui entrent en combinaison.

Ce qui arrive dans les mélanges frigorifiques se reproduit avec quelques modifications dans plusieurs procédés des arts, comme dans l'extraction des métaux, dans la fabrication du verre, et aussi dans les nombreux essais que l'on peut faire au chalumeau, pour la détermination chimique ou minéralogique de diverses substances. On emploie alors des *fondans*, c'est-à-dire des corps qui ont la propriété d'accélérer la fusion des matières avec lesquelles ils sont en contact, à-peu-près comme le sel accélère la fusion de la glace ou de la neige. Le composé qui en résulte étant beaucoup plus fusible que n'est la substance à laquelle on ajoute le fondant, on peut en tirer parti plus facilement : tantôt on le destine à d'autres combinaisons chimiques, comme il arrive à la mine de fer, qui entre en fusion par le fondant et ensuite se désoxide et se carbonise pour se transformer en fonte; tantôt on le travaille immédiatement, comme le verre; tantôt on observe les nuances de sa couleur pour juger par-là des élémens chimiques qui le constituent.

Le tableau suivant contient les points de fusion de diverses substances : j'ai déterminé ceux de ces points qui sont supérieurs à la température du rouge naissant, soit au moyen de mon pyromètre à air précédemment décrit; soit au moyen des capacités pour la chaleur; soit au moyen du pyromètre magnétique, dont la construction sera expliquée dans la seconde partie du calorique.

Tableau du point de fusion de diverses substances, en degrés du thermomètre centigrades.

Noms des substances.	Degrés centésimaux.	Noms des substances.	Degrés centésimaux.
Fer martelé anglais.....	1600°	Alliage, 3 étain, 1 plomb.	167,7
Fer doux français.....	1500	— 1 atome d'étain, 1 bismuth.....	141,2
Aciers, les moins fusibles..	1400	— 1 plomb, 4 étain, 5 bismuth.....	118,9
Aciers, les plus fusibles....	1300	Soufre.....	109
Fonte manganésée.....	1250	Iode.....	107
Fonte grise, 2e fusion.....	1200	2 plomb, 3 étain, 5 bismuth.....	100
Fonte grise très-fusible...	1100	5 plomb, 3 étain, 8 bismuth.....	100
Fonte blanche peu fusible.	1100	4 bismuth, 1 plomb, 1 étain.....	94
Fonte blanche très-fusible.	1050	Sodium.....	90
Or très-pur.....	1250	Potassium.....	58
Or au titre de monnaies.,.	1180	Phosphore.....	43
Argent très-pur.....	1000	Acide stéarique.....	70
Bronze.....	900	Cire blanchie.....	68
Antimoine.....	432	Cire non blanchie.....	61
Zinc.....	360	Acide margarique.....	55 à 60
Plomb.....	334	Stéarine.....	49 à 43
Bismuth.....	256	Spermaceti.....	49
Etain.....	230	Acide acétique.....	45
Alliage, 5 atomes d'étain, 1 de plomb.....	194	Suif.....	33, 33
— 4 étain, 1 plomb.....	189	Glace.....	0, 0
— 3 étain, 1 plomb...	186	Huile de térébenthine....	— 10
— 2 étain, 1 plomb.....	196	Mercure.....	— 39,0
— 1 étain, 1 plomb.....	241		
— 1 étain, 3 plomb.....	289		
— 3 étain, 1 bismuth.....	200		
— 2 étain, 1 bismuth.....	167,7		

140. *Solidification.* — Quand les liquides passent à l'état solide, on observe en général deux conditions correspondantes à celles de la fusion : premièrement, la solidification s'opère à une température fixe, qui est celle de la fusion; secondement, tout le calorique latent, qui a été absorbé pendant la fusion, est reproduit et dégagé pendant la solidification. Il suffit d'un thermomètre ou d'un pyromètre pour démontrer la première de ces vérités; quant à la deuxième, nous ne pourrons indiquer comment on la constate par l'expérience que quand nous donnerons les moyens de mesurer les quantités de calorique latent. On sait cependant, et cette observation a été faite en 1724 par Fahrenheit, on

sait que, dans certaines circonstances, l'eau pure peut être amenée jusqu'à 10 ou 12° au-dessous du zéro, sans se congeler; c'est une sorte d'exception qui se présente dans quelques autres liquides. Ce phénomène, qui a lieu quelquefois à l'air libre, se manifeste plus sûrement quand la surface du liquide ne supporte plus qu'une faible pression produite par de l'air ou de la vapeur; aussi, pour l'observer, il convient d'enfermer le liquide dans des tubes que l'on scelle après y avoir fait le vide, ou de le placer sous le récipient de la machine pneumatique et ensuite de refroidir graduellement, en évitant, autant qu'il est possible, toute espèce d'agitation. Alors, après un certain degré de refroidissement, il suffit d'imprimer au liquide quelque secousse légère, ou de jeter dans sa masse quelques fragmens d'un corps solide quelconque, pour déterminer à l'instant une solidification plus ou moins complète. En même temps, le thermomètre, qui indiquait l'abaissement de température, s'élève subitement et remonte quelquefois jusqu'au terme naturel du changement d'état du corps. La rapidité de la solidification qui a eu lieu dans ces circonstances, et l'ascension du thermomètre, sont deux phénomènes faciles à expliquer : le calorique latent des premières parties qui se congèlent se porte sur les parties voisines qui sont encore liquides; il les réchauffe, mais ne les réchauffe pas assez pour les empêcher de se congeler à leur tour ; de là le double effet de la prompte solidification et du réchauffement. Les dissolutions de sulfate de soude présentent des phénomènes analogues : ces dispositions saturées à chaud laissent peu-à-peu déposer le sel de soude, lorsqu'elles se refroidissent à l'air libre; mais, si on les enferme dans des tubes effilées que l'on scelle à la lampe, après les avoir purgés d'air par l'ébullition, le refroidissement ne donne plus de précipité, et, dès que l'on brise la pointe effilée pour laisser entrer l'air, il y a précipité presque subit et élévation de la température.

Quand le retour à l'état solide se fait au degré de chaleur ordinaire, il se fait toujours lentement et sans aucune élévation de température. Par exemple, quand l'eau gèle à o, la congélation commence en général sur plusieurs points à la fois, et, sur tous ces points, les premières molécules qui se gèlent donnent leur calorique latent aux molécules voisines, qui sont par-là maintenues à l'état liquide pendant quelques instans de plus. C'est pourquoi l'on aperçoit d'abord des lames minces de glaces, ou des aiguilles très-fines, ou des filamens qui se croisent de mille manières dans la masse du liquide. A une certaine distance de ces premiers filamens, il s'en forme d'autres, et ainsi de suite, jusqu'a ce que la chaleur latente se soit peu-à-peu dissipée, et que le froid ait pu saisir successivement toutes les molécules liquides pour les réunir en une seule masse solide. Sans le calorique latent, la solidification des corps se ferait en un instant. Ainsi, la rapidité de la solidification dépend de l'abondance de la chaleur qui se dégage, et de la facilité avec laquelle elle peut se dissiper.

Une même substance liquide peut prendre, en se solidifiant, des aspects et des propriétés très-différentes. Quand le phénomène se produit lentement et sans trouble, il arrive ordinairement que la substance se cristallise et qu'elle prend la plus grande densité dont elle soit susceptible. Au contraire, quand le refroidissement est prompt, ou quand la masse liquide est agitée de quelque manière, les molécules n'ont pas le temps de se grouper et de s'arranger, elles se précipitent brusquement et forment un solide dont toutes les parties intérieures sont dans un état plus ou moins forcé. Nous verrons, en parlant des *actions moléculaires*, les phénomènes singuliers que présentent sous ce point de vue le soufre, le phosphore, le verre et plusieurs autres corps, lorsqu'ils sont subitement refroidis à partir d'une température un peu haute, et surtout lorsqu'ils sont forcés à une brusque solidification. Cependant, que la solidification soit

lente ou rapide, la plupart des corps diminuent de volume à l'instant de ce passage. Tout le monde sait que l'eau éprouve un effet contraire, qu'elle augmente de volume en se congélant; et M. Ermann a observé un phénomène analogue dans l'alliage de quatre parties de bismuth, un de plomb et un d'étain : cet alliage singulier se dilate en se congelant, et il a un maximum de densité a l'état solide, vers 44 degrés.

On doit à M. Rudberg des observations très-intéressantes sur la solidification de divers alliages métalliques de plomb et d'étain, d'étain et de bismuth, d'étain et de zinc, de zinc et de bismuth (*Ann. de Physiq. et de Chim.*, t. 48, p. 353). Par exemple, lorsque l'alliage binaire de plomb et d'étain est formé d'un atome de plomb et de trois atomes d'étain, il se solidifie à environ 187°; mais, s'il est formé en d'autres proportions, il présente deux points de solidification : l'un *fixe*, à 187°; l'autre *mobile*, d'autant plus élevé au-dessus de 187° qu'il y a un plus grand excès de plomb ou d'étain au-dessus de la proportion précitée d'un atome de plomb pour trois d'étain. Il en résulte évidemment qu'il se forme alors deux alliages différens, qui restent mélangés jusqu'à ce que le refroidissement en opère la séparation. Les autres alliages métalliques présentent des phénomènes analogues.

CHAPITRE II.

Des vapeurs dans le vide.

141. *Les vapeurs se forment lentement dans l'air et instantanément dans le vide.* — Lorsqu'un liquide est exposé au contact de l'air, il arrive ordinairement qu'il diminue peu-à-peu de volume, et qu'après un temps plus ou moins long il disparaît tout-à-fait. Ainsi, l'eau qui couvre la terre après les pluies ne résiste pas au souffle d'un vent sec ou à l'action prolongée du soleil; elle se dissipe en quelques jours, et ce n'est pas seulement parce qu'elle s'infiltre dans le sol, mais aussi parce qu'elle s'exhale dans les airs. Au reste, on en voit la preuve dans ce qui arrive à un vase plein d'eau, exposé à l'air libre ou même dans un appartement : l'eau décroît d'instant en instant, et enfin il ne reste au fond du vase que les corps étrangers qu'elle tenait en dissolution. Le même phénomène se produit avec une rapidité encore plus grande lorsqu'on fait bouillir un liquide par l'action du feu : le liquide n'est absorbé ni par le vase ni par le feu, et cependant il disparaît en quelques heures. De ces diverses observations l'on peut conclure que les liquides changent d'état, qu'ils deviennent invisibles et prennent une force expansive comme les gaz; c'est ce que l'on exprime en disant qu'ils se *vaporisent* ou se réduisent en *vapeurs*. Les corps sont d'autant plus *volatils* qu'ils se vaporisent ou qu'ils se volatilisent plus promptement et à des températures moins élevées.

On peut remarquer aussi que, dans certains cas, ce n'est pas le liquide tout entier qui passe à l'état de vapeur ; cela arrive lorsqu'il est un mélange de plusieurs corps différens qui se peuvent séparer par l'*évaporation:* alors, les parties plus volatiles s'exhalent en plus grande abondance, et ce qui

reste n'est plus composé des mêmes élémens, ou du moins il n'en est plus composé dans les mêmes proportions.

Pendant long-temps on a supposé que les vapeurs ne pouvaient ni se former ni subsister par elles-mêmes, mais qu'elles prenaient naissance à la surface des liquides par l'action dissolvante de l'air, et que cette même cause était encore nécessaire pour les maintenir suspendues dans l'atmosphère. Pour montrer la fausseté de cette opinion, et en même temps pour étudier les propriétés remarquables des vapeurs, le moyen le plus simple consiste à leur offrir un espace vide d'air et de gaz, dans lequel elles puissent se développer librement par elles-mêmes. Le vide barométrique est éminemment propre à ce genre d'expériences ; non-seulement parce qu'il est aussi parfait qu'il soit possible, mais aussi parce que la colonne de mercure étant mobile, elle peut indiquer, par sa dépression, l'énergie de la force expansive qui s'exerce sur son sommet.

Supposons donc que, dans une large cuvette v' (*fig.* 205), on dispose deux baromètres b et b' qui donnent très exactement la pression de l'atmosphère, et qu'ensuite, au moyen d'une pipette recourbée, on fasse passer une petite quantité d'eau dans le tube du baromètre b'. L'eau s'élève en vertu de sa légèreté spécifique, elle arrive bientôt dans le vide de Toricelli, et, à l'instant, on voit le sommet de la colonne qui descend de plusieurs millimètres. Ce n'est pas le poids de la petite colonne d'eau supérieure qui a pu déprimer le mercure, ce n'est pas non plus l'air qu'elle aurait pu contenir et qui se serait dégagé, car nous la supposons parfaitement purgée d'air. Il faut donc que la substance propre de l'eau se soit vaporisée dans le vide, et que sa vapeur ait une propriété pareille à celle que nous avons appelée la *force expansive*, la *force élastique* ou la *tension des gaz*, car, elle agit comme ferait une petite quantité d'air que l'on aurait fait passer au-dessus du mercure.

La mesure de cette force élastique est donnée par la *dé-*

pression, c'est-à-dire par l'abaissement du sommet t au dessous du sommet c, ou en général par la différence de hauteur entre le vrai baromètre b et le baromètre à vapeur b'. En effet, si le sommet t est déprimé, par exemple, de quinze millimètres au-dessous du sommet c, c'est qu'il s'est développé dans le vide, au-dessus de t, une force élastique qui fait équilibre à cette colonne de mercure de quinze millimètres.

Un troisième baromètre b'', que l'on mettrait à côté des deux premiers et dans lequel on ferait passer un autre liquide, de l'éther sulfurique par exemple, éprouverait aussi une dépression instantanée, et une dépression beaucoup plus grande que celle du baromètre b', car, en faisant l'expérience à la température ordinaire, le sommet tomberait à-peu-près à la moitié de la hauteur du baromètre b. D'où il résulte que, dans ces circonstances, la force élastique de la vapeur d'éther sulfurique est à-peu-près une demi-pression atmosphérique.

L'appareil représenté (*fig.* 209) est destiné à montrer les diverses forces élastiques des vapeurs différentes et à en donner la mesure au même instant. Il se compose d'une cuvette rectangulaire de fonte dans laquelle plongent 7 ou 8 tubes barométriques contenant des substances différentes; chaque tube a son échelle, dont le 0 est à l'extrémité des 2 pointes d'acier a, a' : pour amener le niveau du mercure de la cuvette à l'affleurement de ces pointes, il suffit de tourner la vis v qui fait monter ou descendre le flotteur f; les vis calantes du pied de l'appareil servent à rendre horizontale la ligne des pointes. Alors, il suffit d'estimer la dépression de chaque tube par rapport à celui du milieu, qui est un baromètre ordinaire. Les substances que l'on soumet ainsi à l'expérience sont l'alcool, les éthers, les huiles essentielles, le camphre, le musc, etc.

142. *Du maximum de tension des vapeurs.* — Il est évident que la force expansive des vapeurs s'exerce, dans tous les

sens, comme la force expansive des gaz; il est évident aussi qu'elle s'exerce indéfiniment, c'est-à-dire qu'une quantité de vapeur, quelque petite qu'elle soit, se répand de toutes parts dans un espace vide, quelque grand qu'il puisse être, et qu'elle va s'arrêter aux parois qui limitent cet espace en y exerçant une pression plus ou moins forte. Ainsi, la moindre parcelle d'eau devient capable, en se vaporisant, de prendre un volume de plusieurs milliers de mètres cubes, comme ferait la moindre parcelle d'air en se répandant dans cet espace. Mais, si les vapeurs ont une force expansive indéfinie, par laquelle elles peuvent prendre des volumes indéfiniment grands, elles n'ont pas une force élastique indéfiniment croissante, par laquelle elles puissent résister aux pressions qu'on exerce sur elles et se réduire à prendre des volumes de plus en plus petits : nous allons voir en effet que, de la vapeur étant donnée, si on essaie de la comprimer pour augmenter sa force élastique, on arrive à un point où cette vapeur se *condense* et repasse à l'état liquide plutôt que de prendre une force élastique plus grande; c'est *cette limite de résistance à être liquéfiée* que l'on appelle *la tension maximum de la vapeur*. Cette vérité fondamentale peut être démontrée facilement au moyen du *baromètre* à *longue cuvette*, qui est représenté (*figure* 204) : son tube *t* est très-long et sa cuvette *cc'* a plusieurs pieds de profondeur. Après avoir fait bouillir, dans toute sa longueur, le tube plein de mercure, on achève de le remplir avec une colonne d'éther de deux ou trois centimètres d'épaisseur, et ensuite on le retourne verticalement pour le plonger dans la cuvette. L'éther gagne la partie supérieure du tube, une partie reste à l'état liquide, et l'autre se vaporise dans le vide de manière à produire une dépression considérable. La colonne *ns* aura, par exemple, 400 millimètres de hauteur, au lieu de 760 qu'elle prendrait s'il n'y avait pas de vapeur. Cela fait, on enfonce le tube dans la cuvette pour essayer de réduire à un moindre volume la vapeur qui s'est formée, et l'on observe alors deux phéno-

mènes remarquables : premièrement, la colonne de mercure *sn* conserve exactement la même hauteur, ce qui prouve que la force élastique de la vapeur reste la même ; secondement, la couche d'éther liquide augmente sensiblement d'épaisseur à mesure que l'on enfonce le tube, ce qui prouve que la vapeur se condense plutôt que de se laisser comprimer dans un moindre espace. Enfin, si l'on enfonce le tube au point de réduire de plus en plus la chambre barométrique, toute la vapeur disparaît et repasse à l'état liquide, sans que le sommet *s* ait éprouvé le moindre abaissement. Donc, la vapeur d'éther a un maximum de force élastique. On peut même remarquer que c'est d'elle-même qu'elle prend ce maximum, sans qu'il soit besoin de la comprimer pour la forcer à l'atteindre ; et il en est toujours ainsi tant qu'elle est en contact avec le liquide qui lui donne naissance, car, en soulevant le tube pour agrandir la chambre barométrique, on observe encore que la colonne de mercure conserve la même hauteur *sn*, tandis que la couche liquide diminue de plus en plus ; ce qui est une preuve visible que la vapeur se forme pour remplir le nouvel espace qui lui est offert et pour arriver toujours au maximum de tension. Mais, si le tube peut être assez soulevé pour que le liquide disparaisse complétement, alors le sommet *s* de la colonne de mercure commence à s'élever, la dépression devient moindre, et, par conséquent, la force élastique de la vapeur cesse d'être à son maximum.

On peut même démontrer qu'à partir de cet instant les tensions sont en raison inverse des volumes, et qu'ainsi les vapeurs se compriment comme les gaz, en suivant la loi de Mariotte, aussi long-temps du moins qu'elles ne sont pas pressées au point de se condenser. Les autres liquides, soumis aux mêmes épreuves, se comportent comme l'éther ; seulement, leurs tensions maximum sont très-différentes.

143. *Équilibre de tension dans un espace inégalement chaud.* — Il est facile de reconnaître que la température a

une grande influence sur la tension maximum des vapeurs, car, en faisant les expériences précédentes à différens degrés de chaleur, la colonne barométrique éprouve des dépressions très-inégales : par exemple, avec l'éther sulfurique, la dépression est à-peu-près de 180 millimètres à 0 de température, tandis qu'elle est de 630 à la température de 30°. Les phénomènes qui se produisent sous nos yeux nous fournissent d'ailleurs des preuves nombreuses de cette vérité : la vapeur d'eau n'a qu'une faible tension lorsqu'elle se forme à la surface des lacs ou à la surface de la mer; elle a une tension plus forte lorsqu'elle se forme par ébullition, puisqu'elle supporte alors la pression de l'atmosphère ; enfin, à de hautes températures, cette tension devient si puissante qu'elle peut non-seulement lancer des projectiles du plus gros calibre, mais encore lancer au loin des machines entières et des masses énormes du poids de plusieurs quintaux : les explosions des machines à vapeur en offrent de trop nombreux et de trop terribles exemples. D'après cela, on peut se demander qu'elle serait la tension maximum de la vapeur, dans un espace de forme quelconque, dont les diverses parties seraient à des températures différentes. En supposant que cet espace n'ait pas une grande hauteur verticale et que la vapeur soit, comme il arrive toujours, d'une faible densité, il faut, par les conditions d'équilibre des fluides élastiques, que la tension soit la même dans tous les points où il y a de la vapeur, et, comme dans les points les plus froids, la tension maximum ne peut jamais être aussi grande que dans les points les plus chauds, il faut bien que, dans ces derniers, la tension cesse d'être au maximum et qu'elle diminue jusqu'à devenir égale à la tension maximum des points les plus froids. Ainsi, dans un espace inégalement chaud, quand l'équilibre est établi, la tension de la vapeur est la même dans tous les points, et partout elle est égale à la tension maximum des parties de cet espace qui sont à la température la plus basse. Ce principe est rendu sensible au moyen de

l'appareil *abc* (*fig.* 212) : la boule *a* étant à moitié pleine d'éther, on fait bouillir ce liquide, puis l'on retourne l'appareil rapidement dans une cuvette de mercure. On forme aussi un baromètre avec de l'éther liquide dans la boule; or, en refroidissant celle-ci, le baromètre monte très-sensiblement.

144. *Mesure de la force élastique de la vapeur d'eau.* — On mesure la tension de la vapeur d'eau, entre 0 et 100°, au-dessous de 0, et au-dessus de 100°, jusqu'aux plus hautes températures. Chacune de ces déterminations exige un appareil différent.

Entre 0 *et* 100°. — L'appareil se compose de deux tubes barométriques placés très-près l'un de l'autre et plongeant dans la même cuvette (*fig.* 213). Le premier de ces tubes est un baromètre parfait; le deuxième est un baromètre-à-vapeur, c'est-à-dire un baromètre au-dessus duquel on a fait passer une colonne d'eau qui s'est en partie vaporisée dans le vide. Ces deux tubes sont plongés dans un vase de verre assez profond, au moyen de la tige de fer *f*; l'eau du vase est portée à diverses températures; sa température est aussi celle du baromètre parfait, celle du baromètre-à-vapeur, et celle de la vapeur elle-même qui se forme à son sommet : on l'observe avec un thermomètre convenablement disposé. Pour avoir la force élastique de cette vapeur correspondante à chaque degré, il suffit alors d'observer la dépression du baromètre-à-vapeur par rapport au baromètre parfait, et l'on y parvient aisément au moyen du kathétomètre précédemment décrit (*fig.* 201). Cette dépression réduite à 0, exprime la véritable tension de la vapeur. Tel est le procédé très-simple qui fut imaginé par Dalton de Manchester, en 1805, pour étudier les vapeurs, et qui lui servit à établir enfin la vraie théorie de leur formation et de leur élasticité.

Au-dessous de 0. — La glace elle-même se vaporise comme l'eau; et l'on voit, dans les figures 210 et 211, un appareil

propre à déterminer la force élastique de la vapeur qu'elle donne à diverses températures au-dessous de zéro. Cet appareil est analogue au précédent (*fig.* 209) : seulement, les deux baromètres à vapeur d'eau et d'alcool sont recourbés pour plonger par leur extrêmité dans un mélange réfrigérant. Ainsi, la chambre barométrique se compose d'une partie froide dont la température est connue, et d'une autre partie qui est à la température ambiante; donc, d'après le principe précédent, la tension maximum de la vapeur est celle qui convient à la température du mélange réfrigérant. On voit même, par cette expérience, comment s'établit l'équilibre de tension; car, on voit, par exemple, la petite colonne d'eau qui repose au sommet du mercure diminuer de plus en plus et disparaître complètement : elle disparaît, parce que la vapeur qu'elle donne, ayant, au moment de sa formation, une force expansive plus grande que la vapeur qui est refroidie à l'extrémité du tube, elle n'a rien qui l'arrête, et va se condenser et se congeler à son tour dans l'espace froid; quelquefois même, la rapidité de l'évaporation est si grande que la petite colonne d'eau se trouve congelée sur le mercure, et ne disparaît alors qu'après un temps très-long. La dépression s'observe comme dans le cas précédent.

Au-dessus de 100°. — Pour montrer qu'au-dessus de 100° la tension de la vapeur d'eau est plus grande qu'une pression atmosphérique, on peut employer un simple tube recourbé (*fig.* 206) dont la courte branche est fermée en *s* : on le remplit de mercure jusqu'à la demi-hauteur de la branche ouverte, et on fait passer en *s* une petite colonne d'eau ; ensuite, on plonge l'appareil dans un bain d'huile dont la température est plus haute que 100° : bientôt la vapeur se forme, et sa force élastique est égale à une pression atmosphérique, plus la différence qui existe entre deux niveaux du mercure dans la branche ouverte et la branche fermée. Mais, pour mesurer exactement les tensions qui s'élèvent à

plusieurs atmosphères et les températures correspondantes, on rencontre de très-grandes difficultés. La science ne possédait sur ce point que des données vagues et incertaines, lorsque MM. Arago et Dulong furent chargés par l'Académie des Sciences de déterminer les forces élastiques de la vapeur d'eau jusqu'aux plus hautes pressions dont on fasse usage dans les applications industrielles. Ce grand travail a été terminé en 1830 : avant d'en rapporter les résultats, nous allons donner une idée des appareils qui ont servi à ces importantes déterminations.

Production de la vapeur. — La vapeur est produite dans une forte chaudière en tôle *c* (*fig.* 220), contenant environ 80 litres. Dans sa portion cylindrique, qui est la plus faible, elle a 13 millimètres d'épaisseur. La même figure représente le fourneau *f*, la grille *g*, et le tuyau *t* par lequel s'échappe la fumée.

Mesure des températures. — Deux canons de fusil *e* et *r*, scellés au couvercle, ouverts en haut, fermés en bas et pleins de mercure, servent à indiquer les températures de l'eau et de la vapeur. Dans le mercure qu'ils contiennent sont établis en permanence des thermomètres dont les tiges, recourbées horizontalement au sortir des canons, sont maintenues à une température constante au moyen d'un courant d'eau. Cette disposition se voit plus en grand dans la figure 217.

Mesure des tensions. — La vapeur formée au-dessus de l'eau, à une température connue, s'élève par le petit tube vertical *bb'* pour venir exercer sa pression en *u*, au sommet de la colonne d'eau qui remplit le tube incliné *u d h*, et toute la partie supérieure du vase manométrique *v v'*. Cette pression se transmet sur la surface *s s'* du mercure, et enfin à l'air du manomètre *m m'* qui est le même que nous avons décrit précédemment (*page* 138). Comme on connaît la pression correspondante à une position donnée du sommet de la colonne du mercure dans le manomètre, on

en déduit la force élastique de la vapeur. Il y a seulement deux corrections à faire : l'une relative à la hauteur verticale de la colonne d'eau, depuis son sommet *u* jusqu'à sa base *s s'* ; et l'autre relative à la hauteur variable du mercure dans le vase *vv'*. C'est pour faire ces corrections avec exactitude que l'on voit, sur la seconde platine du vase *vv'*, un petit tube en verre *nn* communiquant en outre au tube *udh*, et dans lequel on peut observer le niveau du mercure au moyen du curseur qui parcourt la règle verticale *z*.

A mesure que la vapeur arrive en *u*, elle se condense et retombe dans la chaudière ; mais il n'en peut résulter aucune erreur, car on a soin de maintenir le tube *udh* à une température constante dans sa longueur *ud* par un courant d'eau.

MM. Arago et Dulong ont ainsi déterminé directement les tensions de la vapeur d'eau jusqu'à *vingt-quatre* atmosphères. Ils ont reconnu ensuite que les relations qui existent entre les tensions et les températures peuvent être représentées avec une grande approximation par la formule

$$f = (1 + 0{,}7153.\ t)^5 :$$

f représente la tension exprimée en atmosphères ;

t représente les températures supérieures à 100°, exprimées en prenant pour unité l'intervalle de 100°.

Ainsi, pour connaître la force élastique correspondante à 136°, par exemple, il faudrait faire $t = 0{,}36$.

Les trois tableaux suivans contiennent les résultats de l'observation et du calcul :

Le 1er, s'étend de — 20° jusqu'à 100° centigrade d'après l'observation ;

Le 2e, de 1 à 24 atmosphères d'après l'observation, et de 24 à 50 atmosphères d'après le calcul ;

Le 3e, de 100 à 1,000 atmosphères d'après le calcul.

PREMIER TABLEAU.

Forces élastiques de la Vapeur d'eau, de — 20° a 100° centigrades.

DEGRÉS du thermom. centigrade.	TENSION de la vapeur en millimetr.	PRESSION sur un cent. carré en kilogr.	DEGRÉS du thermom. centigrade.	TENSION de la vapeur en millimetr.	PRESSION sur un cent. carré en kilogr.
deg.	mm.	kil.	deg.	mm.	kil.
— 20	1.555	0.0018	55	40.404	0,0549
— 15	1.879	0,0026	56	42,745	0,0581
— 10	2.651	0.0036	57	45.058	0.0612
— 5	3,660	0,0050	58	47,759	0.0646
0	5.059	0.0069	59	50.147	0.0681
1	5,395	0,0074	60	52.968	0,0720
2	5,748	0.0078	61	55,772	0.0758
3	6.125	0.0084	62	58,792	0.0799
4	6.525	0,0089	63	61.958	0,8418
5	6.947	0.0094	64	65.627	0,08916
6	7,396	0,0101	65	68.751	0.09340
7	7.871	0,0107	66	72.395	0,09835
8	8.375	0.0114	67	76,205	0,1055
9	8.909	0.0122	68	80.195	6.10900
10	9.475	0.0129	69	84,370	0,11662
11	10,074	0.0137	70	88,745	0,12056
12	10,707	0.0146	71	93.301	0,12676
13	11.378	0,0155	72	98,075	0,13325
14	12,087	0,0165	73	103,060	0,13999
15	12.837	0.0170	74	108,070	0,14710
16	13.650	0,0186	75	113,710	0.15449
17	14.468	0.0197	76	119.590	0,16220
18	15.355	0.0209	77	125.510	0.17055
19	16.288	0.0222	78	131,500	0.17866
20	17,314	0.0235	79	137.940	0.18756
21	18.317	0.0250	80	144,660	0.19655
22	19,447	0.0265	81	151.700	0,20610
23	20,577	0.0281	82	158.960	0.21586
24	21.805	0,0297	83	165,560	0.22659
25	23.090	0.0314	84	174,470	0.23758
26	24,452	0.0334	85	182.710	0,24825
27	25,881	0.0353	86	191,270	0.25986
28	27.390	0,0374	87	200.180	0.27196
29	29,045	0,0396	88	209.440	0,28434
30	30.645	0.0418	89	219,060	0.29761
31	32.410	0.0440	90	229,070	0,31121
32	34.264	0.0465	91	239,450	0.32552
33	36.188	0,0492	92	250,250	0,33996
34	38,254	0,0520	93	261,450	0,35518

DEGRÉ du thermom. centigr.	TENSION de la vapeur en millimètr.	PRESSION sur un cent. carré en kilogr.	DEGRÉS du thermom. centigrade	TENSION de la vapeur en millimètr.	PRESSION sur un cent. carré en kilogr.
deg.	mm.	kil.	deg.	mm.	kil.
74	275,050	0,37094	88	486,090	0,66040
75	285,070	0,39632	89	505,380	0.68661
76	297,370	0,40428	90	525,28	0,71364
77	310,490	0,42184	91	547,80	0,74152
78	323,890	0,44004	92	566.95	0,77026
79	337,760	0,45888	93	588,74	0,79986
80	352.080	0,47834	94	611,18	0,83035
81	367.000	0,49860	95	634 27	0,86172
82	382,380	0,51950	96	658.05	0.89402
83	398,280	0,54110	97	682.59	0,92736
84	414,730	0,56345	98	707,63	0,96158
85	431,710	0,58652	99	733,46	0,99448
86	449,260	0,61036	100	760,00	1,03253
87	467,380	0,63498			

DEUXIÈME TABLEAU.

FORCES élastiques exprimées en atm. de 76 centimètres de mercure.	TEMPERATURES correspondantes données par le thermomètre centigrade à mercure.	PRESSION sur un centimètre carré en kilogramm.	FORCES élastiques exprimées en atm. de 76 centimètres de mercure.	TEMPERATURES correspondantes données par le thermomètre centigrade à mercure.	PRESSION sur un centimètre carré en kilogramm.
1	100	1,033	13	193,7	13,429
1 1/2	112,2	1,549	14	197,19	14,462
2	121,4	2,066	15	200,48	15,495
2 1/2	128,8	2,582	16	203,60	16.528
3	135,1	3,099	17	206,57	17,561
3 1/2	140,6	3,615	18	209,4	18,594
4	145,4	4,132	19	212,1	19,627
4 1/2	149.06	4,648	20	214,7	20,660
5	153,08	5,165	21	217,2	21,693
5 1/2	156.8	5,681	22	219,6	22,726
6	160,2	6,198	23	221.9	23,759
6 1/2	163,48	6,714	24	224,2	24,792
7	166,5	7,231	25	226,3	25,825
7 1/2	169,37	7,747	30	236,2	30,990
8	172,1	8,264	35	244,85	36,155
9	177,1	9,297	40	252,55	41,320
10	181,6	10,33	45	259.52	46,485
11	186,03	11.363	50	265,89	51,650
12	190,0	12,396			

TROISIÈME TABLEAU.

FORCES élastiques exprimées en atmosphères.	TEMPÉRATURES correspondantes.	PRESSION sur un centimètre carré en kilogr.	FORCES élastiques exprimées en atmosphères.	TEMPÉRATURES correspondantes.	PRESSION sur un centimètre carré en kilogr.
100	311,36	103,3	600	462,71	619,8
200	363,58	206,60	700	478,45	723,1
300	397,65	309,90	800	492,47	826,4
400	423,57	413,20	900	505,16	929,7
500	444,70	516,50	1000	516,76	1033,0

Il paraît bien probable que la formule qui a servi à calculer ces tableaux, représente d'une manière assez approchée les tensions et les températures correspondantes jusqu'à 50 atmosphères.

On ne pourrait pas sans doute se fier à ces indications pour des tensions plus fortes: cependant, le dernier des tableaux précédens a été calculé jusqu'à *mille atmosphères ;* s'il ne représente pas la marche des phénomènes, il représente au moins la marche de la formule.

145. *Tension des vapeurs des divers liquides.* — On voit, dans le tableau précédent, qu'au point d'ébullition la vapeur d'eau a une tension qui fait équilibre à une pression atmosphérique ; cette propriété est tout-à-fait générale: la tension de la vapeur qui se forme par ébullition est toujours égale à la pression qui s'exerce sur la surface du liquide, car, si elle était moindre, la vapeur ne pourrait ni se former, ni subsister en bulles au milieu de la masse liquide, et, si elle était plus forte, elle se serait formée plus tôt, rien n'empêchant qu'elle se forme dès l'instant qu'elle peut vaincre la pression. A l'ébullition, les vapeurs de tous les liquides ayant des ten-

sions égales, M. Dalton avait pensé qu'en s'écartant d'un même nombre de degrés au-dessus et au-dessous de ce point, les tensions ne cesseraient pas d'être encore égales entre elles. Ainsi, d'après cette *loi de Dalton*, et avec la table des tensions de la vapeur d'eau, il suffirait d'avoir le point d'ébullition d'un liquide ou la tension de sa vapeur à une température quelconque, pour déterminer sa tension à toutes les températures possibles. Par exemple l'alcool ayant son point d'ébullition à 78°, la tension de sa vapeur à 113°, c'est-à-dire à 35° au-dessus de son point d'ébullition, serait la même que la tension de la vapeur d'eau à 135°, et par conséquent de 2280^{mm} ou 3 atmosphères; et à 0, c'est-à-dire à 78° au-dessous de son point d'ébullition, sa tension serait la même que celle de la vapeur d'eau à 100—78 ou à 22°, et par conséquent de 19^{mm}, 447. Pareillement, l'éther sulfurique ayant à 20° une force élastique de 431^{mm} 710, l'eau ayant la même tension à 85°, il en résulterait qu'à 30° l'éther sulfurique aurait la même tension que la vapeur d'eau à 95°, et à 35° la même tension que la vapeur d'eau à 100°, etc. Mais il résulte des observations de plusieurs physiciens que cette loi n'est pas absolument rigoureuse : à de grandes distances des points d'ébullition, elle commence 'écarter sensiblement de la vérité, et, s'il est toujours commode de s'en servir lorsqu'on ne veut que des approximations, il serait nécessaire de l'abandonner lorsqu'on voudrait de l'exactitude. Il est donc à souhaiter que, du moins pour les liquides les plus communs, les physiciens dressent des tables de tension pareilles à la table des tensions de la vapeur d'eau.

146. *Densité de la vapeur d'eau.* — Entre tous les moyens qui ont été employés pour obtenir la densité de la vapeur d'eau, celui de M. Gay-Lussac paraît le plus simple et le plus rigoureux ; il consiste à chercher directement le poids, le volume, la température et la tension d'une quantité de vapeur donnée. Pour cela, on se sert de l'appareil qui

est représenté dans la figure 207 : c'est un fourneau *f* sur lequel repose une chaudière *c*, en fonte, dont le bord *b* a été travaillé de manière à former un plan qu'on ajuste avec un niveau dans la direction horizontale ; *g* est une cloche graduée, de trois ou quatre décimètres de longueur, plongeant dans le bain de mercure de la chaudière ; *m* est un manchon de verre dans lequel on verse un liquide qui enveloppe la cloche dans toute sa longueur, depuis le niveau extérieur du mercure, et qui la recouvre à son sommet ; *r* est une règle divisée qui se met verticalement au moyen de la traverse *t*, dont la face plane se pose exactement sur le bord horizontal de la chaudière. La cloche est pleine de mercure bouilli, et en outre on y fait passer une petite ampoule de verre *a*, scellée par les deux bouts et presque entièrement remplie d'eau. On met des charbons sous la chaudière ; le mercure, l'ampoule et l'eau du manchon s'échauffent graduellement, et divers thermomètres donnent à chaque instant leur température commune. A un certain instant, l'ampoule est crevée par l'effort de la dilatation de l'eau qu'elle contient, la vapeur se forme au-dessus de la cloche, le mercure est déprimé, et on pousse la température jusqu'à ce que l'eau soit complètement vaporisée, c'est une condition nécessaire. Alors on maintient les choses dans cet état pour accomplir toutes les observations.

1° L'eau étant toute vaporisée, on connaît le poids de la vapeur, car on a eu soin de peser l'ampoule vide, et de la peser ensuite après l'avoir remplie ; la différence des deux pesées est le poids de l'eau, et par conséquent celui de la vapeur.

2° On observe le nombre des divisions de la cloche qu'occupe la vapeur : chacune de ces divisions ayant une capacité connue à la température 0, on trouvera facilement, par le moyen de la dilatation du verre, sa capacité pour la température où l'on opère, et, de la sorte, on aura le volume réel de la vapeur.

3° Les thermomètres indiquent la température du liquide du manchon et celle de l'eau vaporisée dans la cloche.

4° Enfin, on observe la tension de la vapeur au moyen de la règle *r*. D'abord, on la fait monter ou descendre de manière que sa pointe inférieure vienne affleurer la surface du mercure de la chaudière, et ensuite on fait marcher le *voyant v* jusqu'à ce que le rayon visuel rase le sommet de la colonne du mercure de la cloche. La longueur qui se trouve entre la pointe et le *voyant* est la hauteur de la colonne soulevée: on la réduit à 0, on la retranche de la hauteur actuelle du baromètre, pareillement réduite à 0, et la différence est la dépression de la colonne barométrique ou la force élastique de la vapeur. Si cette force approchait trop de la tension maximum, pour la température à laquelle on opère, il faudrait craindre que toute l'eau ne fût pas vaporisée, et chauffer davantage pour se mettre à l'abri de cette chance d'erreur.

Ayant ainsi le poids d'un volume donné de vapeur à une température, et sous une pression connue, on en déduit aisément le poids d'un centimètre cube. Or, le poids d'un centimètre cube d'air, soumis aux mêmes circonstances de température et de pression, est facile à trouver par la formule que nous avons donnée (132), lorsqu'on sait qu'à 0°, et sous la pression de 760^{mm}, un centimètre cube d'air sec pèse $0^{gr},0012990505$, ou, ce qui revient au même, que sa densité est $d = 0,0012990505$. On pourra donc avoir le rapport du poids de la vapeur au poids de l'air, pris sous le même volume, à la même température et à la même pression, c'est-à-dire la densité de la vapeur par rapport à celle de l'air; et M. Gay-Lussac a trouvé qu'elle en est les $\frac{5}{8}$.

Il est facile ainsi de trouver le volume que doit occuper $1^{gr.}$ de vapeur à la température de 100°, et sous la pression maximum de 760^{mm},

Car un centimètre cube d'air à 0 pesant $0^{gr},0012990503$ sous la pression de 760^{mm}, et ce centimètre cube devenant

1,375 lorsqu'il passe à 100° sous la même pression, l'on voit qu'alors

$$1^{cc},375 \text{ pèse } 0^{gr},0012990505.$$

Et que, par conséquent,

$$1^{gr.} \text{ occupe un volume } \frac{1,375}{0,001299050} = 1058^{cc},47.$$

Ainsi, $1^{gr.}$ de vapeur à 100° sous 760^{mm} doit occuper les $\frac{8}{5}$ de $1058^{cc},47$ ou $1693^{cc},55$; donc, un centimètre cube d'eau, qui pèse 1^{gr}, prend en se vaporisant à 100° un volume de $1693^{cc},55$; c'est-à-dire un volume qui est environ 1700 fois plus grand, pourvu toutefois que sa force élastique soit maximum.

Enfin, avec ces données on peut trouver la densité d' de la vapeur d'eau à une température quelconque t, et sous une pression quelconque p; car en représentant par d sa densité à 100° sous la pression de 760^{mm}, on verra, par un raisonnement analogue à celui que nous avons déjà fait (133), que

$$d' = d\,\frac{p}{760}\,\frac{(1+100\,a)}{(1+at)},$$

a étant le coefficient de la dilatation, qui est commun aux gaz et aux vapeurs, et qui est 0,00375.

Par cette formule, on aura la densité au maximum de tension, lorsque, après avoir donné à t une valeur, on donnera à p la valeur en millimètres de la tension maximum correspondante.

On peut s'étonner que beaucoup d'auteurs prennent la [illegible]ne de discuter longuement la question de savoir si les [illegible]aés de la vapeur sont ou ne sont pas proportionnelles [illegible]bie[illegible]ons. On voit, par la formule précédente, qu'il faut lorsq[illegible]s densités soient proportionnelles aux tensions, et qu'[illegible]eurs sont réduites à une même température, [illegible]ssible que cela soit lorsque l'on considère

les vapeurs à des températures différentes. Et cette formule repose sur deux vérités que personne ne conteste, savoir : premièrement, qu'au-dessous du maximum de tension, les vapeurs se dilatent comme les gaz; et, secondement, qu'elles se compriment suivant la loi de Mariotte.

En calculant les densités de la vapeur d'eau pour diverses températures, on voit qu'elles vont croissant d'une manière très-rapide; d'où il résulte qu'à un certain degré de chaleur la vapeur doit avoir une densité qui ne surpasse que de très-peu la densité du liquide lui-même. Cette conséquence a été vérifiée et rendue frappante par une expérience curieuse de M. Cagniard de la Tour. Un tube de verre très-fort étant rempli d'eau à-peu-près au quart de sa capacité, puis purgé d'air, et ensuite scellé, on l'expose à une température graduellement croissante; alors, à un certain degré de chaleur, l'eau semble disparaître, le tube est comme vide : mais, en refroidissant un peu, le liquide reparaît presque subitement. On pourrait se faire une sorte de jeu de ces alternatives d'apparition et de disparition, si l'on ne devait pas, en les répétant, craindre de dangereuses explosions.

C'est à une température voisine de celle de la fusion du zinc que l'eau se vaporise complètement dans un espace à-peu-près quadruple de son volume à l'état liquide; en même temps, elle agit sur le verre, et lui ôte sa transparence en dissolvant sans doute quelques-uns de ses élémens. D'après cela, on peut présumer qu'à la température rouge, la densité de la vapeur d'eau à son maximum de tension est peu différente de la densité de l'eau liquide, et qu'alors elle a une force expansive de plusieurs centaines et peut-être de quelques milliers d'atmosphères.

En parcourant les tableaux suivans, on pourra prendre une idée de l'accroissement de la densité de la vapeur d'eau à mesure que la température s'élève.

PREMIER TABLEAU.

Densité et volume de la vapeur d'eau, au maximum de tension, en prenant pour unités la densité et le volume de l'eau liquide à 0 :

Depuis — 20° à 100°.

Température.	Tension.	Densité.	Volume.	Température.	Tension.	Densité.	Volum.
deg.	mm.			deg.	mm.		
—20	1,555	0,00000154	650588	38	47,579	0,00004442	22513
—15	1,879	212	470898	39	50,147	4666	21429
—10	2,651	292	342984	40	52,998	4916	20345
— 5	3,660	398	251558	41	55,772	5156	19396
0	5,059	540	182523	42	58,792	5418	18459
1	5,593	573	174495	43	61,958	5691	17572
2	5,748	609	164332	44	65,627	6023	16605
3	6,123	646	154842	45	68,751	6274	15938
4	6,523	686	145886	46	72,595	6585	15185
5	6,947	727	137488	47	76,205	6910	14472
6	7,396	772	129587	48	80,195	7242	13809
7	7,871	818	122244	49	84,570	7602	13154
8	8,375	867	115305	50	88,742	7976	12546
9	8,909	919	108790	51	95,301	8554	11971
10	9,475	974	102670	52	98,075	8755	11424
11	10,074	0,00001032	99202	53	105,060	9174	10901
12	10,707	1092	91564	54	108,270	9606	10410
13	11,378	1157	86426	55	113,710	0,00010054	9946
14	12,087	1224	81686	56	119,390	10525	9501
15	12,837	1299	77008	57	125,310	11011	9082
16	13,630	1372	72913	58	131,500	11523	8680
17	14,468	1451	68923	59	137,940	12044	8303
18	15,353	1534	65201	60	144,660	12599	7937
19	16,288	1622	61634	61	151,700	13179	7594
20	17,314	1718	58224	62	158,960	13760	7267
21	18,317	1811	55206	63	166,560	14374	6957
22	19,417	1914	52260	64	174,470	15010	6662
23	20,577	2021	49487	65	182,710	15668	6382
24	21,805	2133	46877	66	191,270	16356	6114
25	23,090	2252	44411	67	200,180	17060	5860
26	24,452	2376	42084	68	209,440	17797	5619
27	25,881	2507	39895	69	219,060	18566	5386
28	27,390	2643	37858	70	229,070	19355	5167
29	29,045	2794	35796	71	239,450	20174	4957
30	30,643	2938	34041	72	250,230	21013	4759
31	32,410	3097	32291	73	261,450	21889	4569
32	34,261	3263	30650	74	273,030	22794	4387
33	36,188	3435	29112	75	285,070	23789	4204
34	38,254	3619	27636	76	297,570	24702	4048
35	40,404	3809	26253	77	310,490	25699	3891
36	42,743	4017	24897	78	323,890	26739	3741
37	45,038	4219	23704	79	337,760	27789	3599

Température.	Tension.	Densité.	Volume.	Température.	Tension.	Densité.	Volume.
deg.	mm.			deg.	mm.		
80	552,080	0,00028889	5462	91	545,800	0,00045405	2504
81	367,000	50025	3331	92	566,950	44956	2224
82	382,380	51195	3206	93	588,740	46556	2148
83	398,280	52399	3087	94	611,180	48201	2075
84	414,730	53657	2973	95	634,270	49886	2005
85	431,710	54916	2864	96	658,050	51613	1938
86	449,260	56257	2760	97	682,590	53388	1873
87	467,380	57590	2660	98	707,630	55191	1812
88	486,090	58984	2565	99	733,460	57055	1751
89	505,380	40417	2474	100	760,000	58955	1696
90	525,280	41891	2387				

DEUXIÈME TABLEAU.

Densité et volume de la valeur d'eau au maximum de tension, en prenant pour unités la densité et le volume de l'eau liquide à 0 :

Depuis 1 à 24 atmosphères d'après l'observation,
Et depuis 24 à 50 d'après la formule empirique.

Températures.	Forces élastiques exprim. en atm.	DENSITÉ.	VOLUME.	Températures.	Forces élastiques exprim. en atm.	DENSITÉ.	VOLUME.
100	1	0,0005895	1696	193,7	13	0,006107	163,74
112,2	1 1/2	0,0008563	1167,8	197,2	14	0,006527	153,10
121,4	2	0,0011147	897,09	200,5	15	0,006944	144,00
128,8	2 1/2	0,0013673	731,39	203,6	16	0,007359	135,90
135,1	3	0,0016150	619,19	206,6	17	0,007769	128,71
140,6	3 1/2	0,0018589	537,96	209,4	18	0,008178	122,28
145,4	4	0,0020997	476,26	212,1	19	0,008583	116,51
149,1	4 1/2	0,0023410	427,18	214,7	20	0,008986	111,28
153,1	5	0,0025763	388,16	217,2	21	0,009387	106,53
156 8	5 1/2	0,0028091	355,99	219,6	22	0,009785	102,19
160,2	6	0,0030402	328,93	221,9	23	0,010182	98,21
163,5	6 1/2	0,0032683	305,98	224,2	24	0,010575	94,56
166,5	7	0,0034911	286,12	226,5	25	0,010968	91,17
169,4	7 1/2	0,0037217	268,82	236,2	30	0,012903	77,50
172,1	8	0,0039434	253,59	244,8	35	0,014665	68,20
177,1	9	0,0043865	227,98	252,5	40	0,016644	60,08
181,6	10	0,0048226	207.36	259,5	45	0,018497	54,06
186,0	11	0 0052557	190.27	265,9	50	0,020306	49,31
190,0	12	0,0056854	175,96				

TROISIÈME TABLEAU.

Densité et volume de la vapeur d'eau au maximum de tension, en prenant pour unités le volume et la densité de l'eau à 0 :

De *cent* à *mille* atmosph., d'après la formule empirique.

Températures.	Forces élastiques exprimées en atmosph.	Densité.	Volume.	Températures.	Forces élastiques exprimées en atmosph.	Densité.	Volume.
344,36	100	0,037417	26,72	462,74	600	0,17791	5,621
363,58	200	0,068635	14,570	478,45	700	0,20318	4,921
397,65	300	0,097674	10,238	492,47	800	0,2279	4,387
423,57	400	0,12534	7,978	505,16	900	0,2522	3,965
444,70	500	0,15202	6,578	516,76	1000	0,276	3,622

Densité des vapeurs de divers liquides. (Voyez le tableau de densités, page 285.)

Les densités des vapeurs de tous les liquides ne peuvent pas être déterminées par le procédé qui nous a servi pour la vapeur d'eau ; mais l'on doit à M. Dumas un autre procédé dont il s'est servi avec succès dans l'important travail qu'il a publié sur ce sujet (*Ann. de Physique et de Chimie*, t. 33, p. 337). M. Dumas prend un ballon à col effilé (*fig.* 221); il y met une quantité suffisante du liquide qu'il veut soumettre à l'expérience, puis il chauffe ce ballon dans un bain d'eau, d'acide sulfurique, ou d'alliage fusible. Quand le liquide commence à entrer en ébullition, l'on modère la température et l'on chauffe aussi également qu'il soit possible toute la surface du ballon et même son col effilé. L'ébullition terminée, on chauffe encore avec les mêmes précautions jusqu'à une température un peu plus élevée ; alors on note cette température avec soin, on observe le baromètre, et, d'un trait de chalumeau, on scelle la pointe effilée du ballon. Il reste ensuite à faire trois pesées : 1° le ballon avec la va-

peur qu'il contient; 2° le ballon plein d'eau; 3° le ballon plein d'air sec. De la seconde on déduit la capacité, de la troisième le poids du verre, et enfin de la première le poids de la vapeur. C'est par ce moyen que M. Dumas a obtenu les nombres contenus dans le tableau de la page 285.

Au maximum de tension, les vapeurs de tous les liquides connus augmentent de densité à mesure que la température s'élève. D'où il suit que tout le liquide peut, à une température plus ou moins haute, disparaître complètement dans un espace un peu plus grand que celui qu'il occupe. C'est aussi ce que M. Cagniard de La Tour a fait voir pour l'alcool, l'éther et le sulfure de carbone. Il a de plus observé la température à laquelle se produit le phénomène, et mesuré la tension qu'exerce alors la vapeur. Pour cela, il faisait ses expériences dans un tube recourbé, semblable à-peu-près à un baromètre à siphon. La branche courte avait 4 à 5 millimètres de diamètre, elle contenait le liquide; et la plus longue, 1 millimètre seulement; elle contenait de l'air : mais le liquide et l'air étaient séparés par du mercure qu'on avait d'avance versé dans la courbure quand les deux branches étaient ouvertes; le mercure repoussé par la pression pouvait remplir toute la longueur du tube à air. Les deux branches étant scellées, la colonne d'air, de plus en plus réduite, faisait l'office de manomètre, pour marquer la tension de la vapeur; quant à sa température, elle était donnée par celle du bain d'huile fixe, dans lequel on plongeait l'extrémité inférieure de l'appareil et toute la longueur de la courte branche.

L'instant de la disparition et de la réduction complète en vapeur arrive dans les circonstances et aux conditions suivantes :

	Température de disparition.	Volume de la vapeur par rapport au volume du liquide.	Tension de la vapeur en nombre d'atmosphères.
Alcool (à 36° Beaumé)..	259°.....	3.....	119 atm.
Ether.....	200°.....	2.....	37
Sulfure de carbone...	275°.....	2.....	78

147. *Condensation des vapeurs, et liquéfaction des gaz.* — Les vapeurs se condensent par compression et par refroidissement. Lorsque la vapeur sature l'espace qu'elle occupe, il suffit d'exercer sur elle une pression un peu supérieure à sa tension maximum, ou d'abaisser un peu sa température, pour qu'à l'instant elle se liquéfie dans une certaine proportion : mais, quand elle ne sature plus l'espace, elle se laisse comprimer comme les gaz, et refroidir comme eux. Cette identité parfaite, entre les propriétés caractéristiques des gaz et celle des vapeurs, avait fait supposer depuis long-temps que les gaz appelés *permanens* pourraient bien n'être que des vapeurs plus ou moins éloignées de leur maximum de tension. Plusieurs expériences avaient été faites dans cette vue par divers moyens, mais toujours tentées sans succès, soit à cause de la difficulté qu'on éprouve à produire de grandes pressions, soit à cause de la chaleur qui se dégage lorsqu'on les produit subitement. Enfin, par un procédé plus sûr et plus ingénieux, sir H. Davy et M. Faraday sont parvenus à liquéfier plusieurs des fluides élastiques que l'on appelait *gaz permanens*. Ce procédé consiste à enfermer, dans un tube de verre très-fort, un réactif et une substance solide qui dégagent par la réaction chimique le gaz que l'on veut soumettre à l'épreuve. Ainsi, c'est le gaz qui se comprime lui-même à mesure qu'il se dégage en plus grande abondance, et, de cette manière, on peut aisément produire des pressions de 40 ou 50 atmosphères; de plus, on peut refroidir l'une des extrémités du tube, pour ajouter le refroidissement à la compression.

Le tableau suivant contient, dans la première colonne, les

noms des gaz liquéfiés ; dans la deuxième, les diverses températures auxquelles les liquides ont été soumis ; et, dans la troisième, les tensions correspondantes exprimées en atmosphères. Ces tensions ne peuvent être considérées que comme des premières approximations que des expériences plus précises devront sans doute modifier.

Tableau de la liquéfaction des gaz.

NOMS DES GAZ LIQUÉFIÉS.	TEMPÉRATURES en degrés centigrades.	TENSIONS des liquides exprimées en atmosphères.
Acide sulfureux.	+ 7	2
Cyanogène	+ 7	3,6
Chlore.	+15,5	4
Ammoniaque.	0	5
Idem.	+10	6,5
Hydrogène sulfuré	—16	14
Idem.	+10	17
Acide muriatique	—16	20
Idem.	— 4	25
Idem.	+10	40
Acide carbonique	—11	20
Idem.	0	36
Oxide nitreux.	0	44
Idem.	+ 7	51

Les autres gaz ont été soumis à des expériences analogues, sans qu'on ait pu jusqu'à présent parvenir à les liquéfier.

Cependant, il n'y a aucun doute qu'ils ne puissent, par leur nature, prendre aussi l'état liquide. Dans les nouveaux essais que l'on pourra tenter sur ce sujet, on se donnera des chances de succès, en produisant des froids de plus en plus vifs, car tout annonce qu'une différence d'un seul degré de chaleur peut produire des différences de tension de plusieurs atmosphères.

D'après les observations récentes de M. Thilorier, l'acide carbonique liquide donne de la vapeur dont la force élastique est de 36 atmosphères à la température zéro et de 73 atmosphères à la température de 30° ; ainsi, trente degrés de chaleur suffisent pour doubler sa tension en ce point de l'échelle thermométrique;

Sa dilatation présente un phénomène très extraordinaire, elle est quatre fois plus grande que celle de l'air : car, au lieu d'être de $\frac{30}{267}$ en passant de 0 à 30°, elle se trouve être de $\frac{116}{267}$. Sa densité à diverses températures est par conséquent incomparablement plus variable que celle des autres liquides ; elle parait être, par rapport à l'eau, de

0,90 à la température de	— 20°
0,83	0
0,60	30

Si l'acide sulfureux donne déjà en se vaporisant un degré de froid très-considérable, on peut s'attendre à obtenir avec l'acide carbonique des effets encore plus surprenans. Aussi, M. Thilorier a-t-il obtenu un froid de 90° centigrades au-dessous de 0 en dirigeant sur la boule d'un thermomètre à alcool un jet de vapeur d'acide carbonique. Cet effet n'est même pas la limite de ce que l'on peut obtenir, car le refroidissement considérable que cette vapeur éprouve au moment de son expansion dans l'air est suffisant pour congeler sa substance; de telle sorte qu'elle produit des flocons d'acide carbonique solide, comme la vapeur d'eau produit des flocons de neige dans des circonstances analogues. M. Thilorier a pu recueillir un volume très-considérable de ce corps solidifié, et dans cet état il se dissipe peu-à-peu, en se vaporisant de nouveau à mesure que les corps voisins lui fournissent la chaleur latente nécessaire.

CHAPITRE III.

Des vapeurs mélangées avec les Gaz.

148. Les liquides qui ne se combinent pas chimiquement peuvent bien être mêlés pendant quelques instans, mais ils se séparent peu-à-peu et se dégagent l'un de l'autre pour se superposer dans l'ordre de leurs densités, comme l'huile se superpose sur l'eau. Si les gaz et les vapeurs avaient des propriétés pareilles, tout serait changé sur la terre : on verrait, par exemple, les vapeurs qui se forment à la surface des eaux s'élever comme des ballons, en vertu de leur légèreté spécifique ; et, poussées de la sorte jusqu'aux dernières couches de l'atmosphère, elles en sortiraient par leur élasticité pour se répandre de toutes parts dans le vide ; l'évaporation étant continuelle, cette ascension se renouvellerait sans cesse ; à la fin, les lacs et les bassins des mers seraient à sec, et toutes les eaux de la terre seraient suspendues au-dessus de l'atmosphère.

Il est donc visible que les fluides élastiques, dans leurs mélanges, n'obéissent pas, comme les liquides, aux lois de la densité.

Cette vérité fondamentale a été mise hors de doute par une expérience directe. Berthollet avait fait descendre dans les caves de l'Observatoire deux ballons séparés par un robinet : l'un était plein d'hydrogène, et l'autre d'acide carbonique, à la même pression ; après les avoir disposés, l'hydrogène en haut et l'acide carbonique en bas, on attendit long-temps avant de tourner le robinet pour établir la communication. Les deux gaz étaient certainement à la même température, dans le repos le plus absolu et à l'abri de toute agitation. Cependant le mélange se fit assez promptement :

la moitié de l'hydrogène, malgré sa légèreté, descendit dans le ballon inférieur, et la moitié de l'acide carbonique, malgré sa densité, s'éleva dans le ballon supérieur. Ainsi, chacun des gaz pénétra l'autre et s'étendit, par sa force expansive, pour occuper tout l'espace qui lui était offert : en doublant de volume, chacun prit une élasticité moitié ; mais l'élasticité totale resta la même, c'est-à-dire égale à la somme des élasticités partielles.

Ce qui arrive pour deux gaz mélangés arrive pour un plus grand nombre, et le principe général du mélange des fluides élastiques est le suivant : *Lorsqu'on accumule dans le même espace divers fluides élastiques, qui sont sans action chimique, chacun se répand dans toute l'étendue de cet espace, et l'élasticité du mélange est égale à la somme des élasticités que prendrait chacun des fluides s'il était seul.*

Cette vérité peut être constatée pour les vapeurs, au moyen de l'appareil suivant : *t* (*fig.* 202) est un tube large et gradué, portant à chaque extrémité un robinet en fer; le robinet supérieur *s* n'est pas *percé* de part en part, il est seulement *creusé*, et s'appelle, pour cette raison, *robinet à capsule*. A sa partie inférieure, le tube *t* communique au tube *t'*, qui est plus long et plus étroit. On peut enlever le robinet supérieur pour faire passer dans l'appareil un courant d'air sec; alors on remet le robinet, on verse du mercure par la branche ouverte, on incline plus ou moins pour faire sortir l'air excédant, et l'on arrive aisément à avoir, dans le grand tube *t*, de l'air sec qui se trouve sous la pression atmosphérique. Ensuite, on met un liquide au-dessus du robinet à capsule, on tourne ce robinet toujours dans le même sens pour faire tomber le liquide goutte à goutte, et l'on observe les phénomènes suivans. On voit le mercure baisser peu-à-peu, et, en même temps, on voit la couche liquide diminuer d'épaisseur. Donc, la vapeur se forme dans l'air, et elle se forme lentement ; ce qu'on pourrait conclure aussi des évaporations qui se font librement dans l'atmo-

sphère. Mais, ce qui est curieux à observer, c'est que cette vapeur a un maximum de tension, et un maximum qui est dans l'air exactement le même que dans le vide. En effet, si l'on verse du mercure par la branche ouverte pour ramener le mélange gazeux à son volume primitif, on voit que sa force élastique est plus grande qu'elle n'était d'abord d'une quantité qui est précisément égale à la tension maximum de la vapeur, pour la température où l'on opère. On arrive encore à la même conclusion, lorsqu'on fait passer le mélange d'air et de vapeur à des pressions plus fortes, en versant une nouvelle quantité de mercure par la petite branche, ou, lorsqu'on le fait passer à des pressions plus faibles, en ouvrant le robinet pour laisser sortir du mercure. Dans tous les cas, en tenant compte des variations de volume que l'air éprouve, on voit que, constamment, la force élastique du mélange est la somme des forces élastiques de l'air et de la vapeur.

La vapeur, mélangée avec un autre fluide élastique, se condense par deux causes, comme la vapeur isolée dans le vide, savoir : par un excès de pression, ou par un abaissement de température. Ainsi, l'air atmosphérique étant toujours humide, surtout dans les basses régions qui avoisinent la terre, si l'on prend, par exemple, un litre d'air à la température de 20°, sous la pression ordinaire de 760 millimètres, et que la vapeur, pour sa part, supporte 10 millimètres de cette pression, l'espace ne sera pas saturé d'humidité; mais, en comprimant ce mélange gazeux, on augmentera la tension de la vapeur aussi bien que celle de l'air, et on les augmentera proportionnellement jusqu'à ce que la vapeur atteigne sa tension maximum ; alors, si on exerce une compression plus grande, la vapeur sera condensée en partie et se déposera sous forme de rosée sur les parois du vase. De même, en reprenant le même litre d'air, si on le refroidissait au lieu de le comprimer, on verrait encore la vapeur se condenser, et au même degré de refroidissement que si elle était seule et sans mélange d'aucun gaz. En généralisant ces consé-

quences, on voit que, dans un espace donné, dans un litre, par exemple, on peut renfermer autant de substances gazeuses que l'on voudra, sans que ces substances se gênent l'une l'autre : il faudra seulement exercer une pression égale à la somme des pressions que chacune d'elles peut supporter. Et si un tel mélange était soumis à des pressions croissantes ou à des degrés de froid de plus en plus intenses, il présenterait des phénomènes curieux par la liquéfaction successive des divers élémens, qui s'arrangeraient ensuite suivant l'ordre de leur densité.

Les mélanges gazeux présentent une question théorique très-importante, c'est la question de savoir si les molécules de diverses natures exercent une pression l'une sur l'autre ; si, par exemple, les molécules d'air pressent les molécules de vapeur d'eau, et réciproquement. Tout semble indiquer qu'il n'y a de réaction mutuelle qu'entre les molécules de même espèce : cependant nous verrons, en étudiant la propagation du son dans les mélanges de cette nature, qu'il y a une communication uniforme du mouvement vibratoire, qui suppose une action à distance entre toutes les molécules sans distinction.

Pour compléter ces notions générales, nous indiquerons plusieurs problèmes qui peuvent se présenter dans la pratique.

1° Étant donné un vase *extensible*, contenant un volume v de gaz, qui exerce une pression p contre les parois, on demande quelle pression il exercera si l'on y fait passer un liquide dont la vapeur sature l'espace avec une tension maximum représentée par f :

La pression deviendra évidemment $p+f$.

2° Étant donné un vase indéfiniment *extensible*, contenant un volume v de gaz, sous une pression p, déterminer le volume qu'il prendra si l'on y fait passer un liquide dont la vapeur sature l'espace avec une tension maximum représentée par f ; on suppose que ni la pression extérieure p

ni la température ne changent pendant cette expérience :

A mesure que la pression intérieure augmente par la formation de la vapeur, elle diminue par l'expansion du gaz, et, comme elle doit pour l'équilibre rester égale à la pression extérieure p, il faudra, puisque la vapeur supporte f pour sa part, que le gaz supporte $p-f$; donc, le volume v s'accroîtra au point de devenir $\frac{v\,p}{p-f}$.

3° Un mélange gazeux a une force élastique p à la température t; il prend une force élastique p' à la température t', sans que son volume change sensiblement : on demande s'il s'est formé des vapeurs ou s'il s'en est précipité, et quel est le point d'ébullition du liquide qui a donné naissance à ces vapeurs, s'il y en a.

S'il n'y avait aucune vapeur de développée ou de condensée, la pression deviendrait $p\,\frac{(1+at')}{1+at}$;

ainsi, $p'-p\,\frac{(1+at')}{1+at}$ sera la force élastique de la vapeur perdue ou gagnée.

Supposant que la vapeur est au maximum de tension et voyant quelle est sa force élastique entre les températures t et t', on peut, d'après la loi de Dalton, trouver sa point d'ébullition.

CHAPITRE IV.

De l'Ebullition et de l'Evaporation.

149. La transformation des liquides en fluide élastique s'appelle en général *vaporisation*. Les liquides se vaporisent par *ébullition*, c'est-à-dire quand les vapeurs se forment au sein de la masse; et par *évaporation*, c'est-à-dire quand elles se forment à la surface.

150. Lorsqu'on observe l'ébullition d'un liquide, on ne voit en général qu'un mouvement plus ou moins rapide qui mêle toutes les parties de la masse et qui les agite dans tous les sens; mais quand on excite l'ébullition dans un vase de verre, on aperçoit la cause toujours changeante qui produit les mouvemens. On reconnaît que des bulles de vapeur se forment sur les parois échauffées du vase, qu'elles s'élèvent en vertu de leur légèreté, et qu'elles viennent éclater à la surface : elles sont d'abord petites au moment où elles se forment, mais elles prennent du volume à mesure qu'elles s'élèvent; et celles qui partent des points du vase les plus chauds sont celles qui se succèdent avec le plus de rapidité. Pour que ces bulles puissent se former et s'élever au milieu de la masse liquide qui les presse de toutes parts, il faut évidemment que la vapeur dont elles se composent ait une tension égale à la pression environnante; c'est là ce qui détermine les points d'ébullition des différens liquides, et aussi les points d'ébullition du même liquide soumis à des pressions différentes. Ainsi, la première condition de l'ébullition est que la température soit assez haute pour que la force élastique de la vapeur puisse vaincre toutes les pressions qui se font sentir dans la masse liquide. La seconde condition, comme nous l'avons déjà vu, est que la vapeur trouve à absorber le calorique latent nécessaire à sa formation.

De la première condition il résulte que tout ce qui fait varier la pression du liquide ou la tension de la vapeur, fait changer aussi le point d'ébullition ; et il résulte de la seconde que la rapidité de l'ébullition dépend seulement de la quantité de chaleur qui est fournie aux parois extérieures du vase dans un temps donné, et qui peut passer de là aux parois intérieures, puis à la portion du liquide qui se vaporise. Ces deux conséquences exigent quelques développemens.

151. *Du point d'ébullition.* — Les causes qui peuvent faire varier le point d'ébullition d'un même liquide sont principalement la pression qu'il supporte et les substances qu'il peut tenir en dissolution ; ensuite la cohésion du liquide et la nature du vase qui le contient exercent aussi quelque influence, mais dans des limites très-restreintes.

Influence de la pression. — Au niveau de la mer, sous la pression ordinaire de 760^{mm}, l'eau bout à 100°; au sommet du Mont-Blanc, dont la hauteur est de 4775 mètres, et où la pression atmosphérique est d'environ 417^{mm}, l'eau doit entrer en ébullition à la température pour laquelle la tension est 417^{mm}, c'est-à-dire à 84° environ. Si l'on pouvait s'élever plus haut, la pression devenant moindre, l'ébullition se ferait à une température encore plus basse. En général, connaissant le tableau de la tension de la vapeur d'un liquide, son point d'ébullition *sous une pression donnée* sera facile à trouver, puisqu'il sera toujours le degré de chaleur qui donne à la vapeur une tension maximum capable de vaincre cette pression. Réciproquement, on pourra faire bouillir un liquide à une température donnée, puisqu'il suffira toujours de diminuer la pression au point qu'elle soit moindre que la tension du liquide pour cette température.

Par exemple, sous une pression de 30^{mm}, l'eau doit bouillir à 30°, puisque à cette température la tension de l'eau est un peu plus grande que 30^{mm}; sous une pression de 10^{mm}, l'eau doit bouillir à 11° ; et, sous une pression de 5^{mm}, l'eau doit bouillir à 0.

Ces conséquences se vérifient facilement de la manière suivante : on met de l'eau à 30°, dans un vase en verre sous le récipient de la machine pneumatique, et après quelques coups de piston, quand l'éprouvette ne marque plus que 30^{mm} de tension, l'ébullition commence avec un grande force, comme si l'eau était sur un feu très-vif et soumise à la pression de l'air. Cette ébullition cesse bientôt, parce que la vapeur remplit le récipient et presse la surface liquide ; mais, par de nouveaux coups de piston, on enlève la vapeur comprimante et on fait recommencer l'ébullition. Avec nos machines ordinaires il serait impossible de faire bouillir de l'eau à 0, puisqu'il serait impossible de maintenir le vide à 5^{mm}, à cause de la vapeur qui s'exhale sans cesse de la surface du liquide.

L'appareil qui est représenté *fig.* 218, montre ces phénomènes d'une manière encore plus frappante. C'est un ballon à long col *a*, fermé par un bouchon *b*. Ce ballon est à moitié plein d'eau ; on le met en pleine ébullition, et, quand tout l'air est chassé, on met le bouchon *b* ; ensuite on le retourne dans la position que représente la figure. Lorsqu'il est abandonné à lui-même, on n'observe pas d'ébullition sensible, cela est tout simple : mais si l'on verse à la partie supérieure de l'eau froide, alors l'ébullition se manifeste à l'instant avec beaucoup de force. L'eau froide fait bouillir l'eau du ballon, parce qu'elle condense la vapeur et diminue la pression qui s'exerçait sur le liquide. On peut même se donner ainsi le spectacle d'une ébullition sans feu qui dure des heures entières.

La variation du point d'ébullition a aussi été vérifiée par des expériences directes sur les lieux élevés, dans les Alpes, dans les Pyrénées, et sur d'autres montagnes.

L'eau bouillante n'est donc pas également chaude dans tous les lieux de la terre, et par conséquent elle n'est pas également propre aux usages domestiques et à la préparation des alimens. A Quito, par exemple, l'eau bout à 90, et cette tem-

pérature est beaucoup trop basse pour cuire beaucoup de substances qui peuvent être cuites à 100°.

Le tableau suivant contient des points d'ébullition de l'eau dans plusieurs lieux habités, dont les hauteurs sont bien connues.

NOMS DES LIEUX.	HAUTEUR au-dessus de l'Océan.	HAUTEUR moyenne du barom.	DEGRÉ d'ébullit. de l'eau.
	mèt.	mm.	dég.
Métairie d'Antisana	4101	454	86,3
Ville de Micuipampa (Pérou)	3618	483	87,9
Ville de Quito	2908	527	90,1
Ville de Caxamarca (Pérou)	2860	531	90,3
Santa-Fé de Bogota	2661	544	90,9
Ville de Cuença (province de Quito)	2633	546	91,0
Mexico	2277	572	92,3
Hospice du Saint-Gothard	2075	586	92,9
Village de Saint-Véran (Alpes-Marit.)	2040	588	93,0
Vill. de Breuil (vall. de Mont-Cervin)	2007	591	93,1
Village de Maurin (Basses-Alpes)	1902	599	93,5
Village de Saint-Remi	1604	621	94,5
Village de Heas (Pyrénées)	1465	632	94,9
Village de Gavarnie (Pyrénées)	1444	634	95,0
Briançon	1306	645	95,5
Village de Baréges (Pyrénées)	1269	648	95,6
Palais de Sainte-Ildefonse (Espagne)	1155	657	96,0
Bains du Mont-d'Or (Auvergne)	1040	667	96,5
Pontarlier	828	685	97,1
Madrid	608	704	97,8
Inspruck	566	708	98,0
Munich	538	710	98,1
Lausanne	507	713	98,3
Augsbourg	475	716	98,4
Salzbourg	452	718	98,4
Neufchâtel	438	719	98,5
Plombières	421	721	98,5
Clermont-Ferrant (préfecture)	411	722	98,5
Genève et Freyberg	372	725	98,6
Ulm	369	726	98,7
Ratisbonne	362	726	98,7
Moscou	300	732	99,0
Gotha	285	733	99,0

NOMS DES LIEUX.	HAUTEUR au-dessus de l'Océan.	HAUTEUR moyenne du barom.	DEGRÉ d'ébullit. de l'eau.
	mèt.	mm.	deg.
Turin	250	758	99.1
Dijon	217	740	99,2
Prague	179	745	99,5
Mâcon (Saône)	168	744	99,4
Lyon (Rhône)	162	745	99,4
Cassel	158	745	99,4
Gottingue	154	747	99,5
Vienne (Danube)	155	747	99.5
Milan (Jardin botanique)	128	748	99,5
Bologne	121	749	99,5
Parme	95	751	99,6
Dresde	90	752	99,6
Paris (Observatoire royal, 1er étage)	65	754	99,7
Rome (Capitole)	46	756	99,8
Berlin	40	756	99,8

Dans un même lieu le baromètre éprouvant des variations continuelles, il en résulte que le point d'ébullition change à chaque instant. Pour Paris les hauteurs extrêmes du baromètre observées depuis 20 ans ayant été 719mm et 781mm, on voit que le plus haut degré d'ébullition, correspondant à 781mm, a été d'environ 100°,8 ; et le plus bas, correspondant à 719, d'environ 98 ,5. Il est facile de voir comment on doit tenir compte de la hauteur du baromètre au moment où l'on marque le point d'ébullition sur l'échelle d'un thermomètre.

Le révérend F. J. H. Wollaston a construit un thermomètre très-sensible, marquant seulement les degrés qui avoisinent le point d'ébullition, et au moyen duquel on peut constater la différence de température entre l'eau qui bout à un étage et celle qui bout à l'étage supérieur. La construction de ce thermomètre exige beaucoup de précautions ; mais ce qu'il y a d'essentiel, c'est que chaque degré y occupe une longueur de trente millimètres au moins.

Lorsqu'on augmente la pression au lieu de la diminuer, on retarde l'ébullition, et on peut la retarder indéfiniment en augmentant indéfiniment la pression. C'est ainsi que dans l'appareil si connu sous le nom de *marmite à Papin* ou de *digesteur de Papin*, on peut élever l'eau jusqu'aux plus hautes températures sans la faire bouillir. Cet appareil (*fig.* 219) n'est autre chose qu'un vase cylindrique en bronze ou en fer dont les parois sont capables d'une grande résistance. L'ouverture en est petite, et on la ferme avec une soupape sur laquelle on met des poids de manière à produire une pression de quarante ou cinquante atmosphères suivant la force des parois. L'ébullition est impossible, puisque la vapeur qui se forme au-dessus du liquide exerce une pression toujours suffisante pour l'empêcher. Mais lorsqu'on ouvre la soupape, l'eau s'élance en vapeur avec une telle impétuosité qu'elle forme un jet de vingt ou trente pieds de hauteur; en même temps, le vase est fort refroidi à cause de la chaleur qu'il a dû fournir à l'eau pour sa vaporisation.

Le digesteur fut inventé par Papin, vers le milieu du dix-septième siècle; il servit alors à une foule d'expériences curieuses : soit pour montrer la puissance mécanique de la vapeur; soit pour montrer la puissance dissolvante de l'eau, maintenue liquide à des températures plus hautes que 100°. Ce ne fut pas sans un grand étonnement que l'on vit alors la possibilité d'extraire des os une substance nutritive aussi bonne et presque aussi abondante que celle qui se tire des parties musculaires les plus succulentes.

L'*autoclave* est un appareil de même genre que le digesteur de Papin, il en diffère seulement par une ingénieuse modification. Outre l'ouverture de la soupape, qui est toujours très-petite, l'autoclave porte une autre ouverture, de grandeur arbitraire et de forme essentiellement *elliptique;* par l'avantage de cette forme, le couvercle, quoique plus large, peut être mis en dedans; alors c'est la tension de la vapeur qui le presse contre les parois : ainsi, l'appareil se

ferme de lui-même, et se ferme d'autant mieux que la tension est plus forte.

Si l'eau n'est pas hermétiquement enfermée dans une chaudière, et s'il se trouve quelque issue par où la vapeur puisse s'échapper, le point d'ébullition dépend alors de la grandeur de l'ouverture, comparée à la surface de l'eau qui reçoit l'action du feu. Voici un tableau des températures approchées que peut prendre l'eau dans ces circonstances sous la pression ordinaire :

Température que prend l'eau dans la chaudière.	Rapport de la surface de l'orifice à la surface de l'eau qui reçoit le feu.
100°	$\frac{1}{1000}$ et au-dessus.
105	$\frac{1}{5000}$
115	$\frac{1}{10000}$
138	$\frac{1}{20000}$

Il paraît que, dans le même temps, la quantité de vapeur qui sort par chacune de ces ouvertures est à-peu-près la même. Ainsi, en 1', le poids d'eau vaporisée qui s'élève d'une chaudière tout-à-fait ouverte, à 100° de température, serait à-peu-près le même que le poids d'eau vaporisée qui jaillirait de la même chaudière, à 138°, par une ouverture dont la surface serait $\frac{1}{20000}$ de celle de l'eau qui reçoit le feu.

Dans une masse liquide très-profonde, outre la pression qui s'exerce à la surface, les molécules du fond supportent encore toute la pression due à la colonne liquide supérieure. Ainsi, dans une chaudière pleine d'eau, de trente-deux pieds de profondeur, les couches du fond supportent deux atmosphères, et par conséquent les bulles de vapeur ne peuvent s'y former, à moins que la température ne soit de 121°; c'est donc là le point d'ébullition de l'eau pour cette profondeur. Mais les couches superficielles ne pouvant être qu'à 100°, il arrive que les couches du fond s'élèvent sans cesse,

à cause de leur dilatation ; qu'elles forment des bulles de vapeur à cause de l'abaissement de la pression, et, par conséquent, qu'elles se refroidissent et passent successivement par toutes les températures, depuis 121° jusqu'à 100°. Dans les vases qui n'ont même que quelques pouces de profondeur, il se produit un phénomène analogue, avant que l'ébullition ne commence. Les couches du fond prennent aux parois du vase assez de chaleur pour se vaporiser, de petites bulles se forment et s'élèvent, mais, en gagnant les couches supérieures qui sont encore trop froides, elles se condensent subitement. De là ce bruit singulier qui précède de quelques instans l'ébullition des liquides. On s'en assure aisément en faisant l'expérience dans des ballons de verre, car on voit les bulles se former, s'élever un peu, et disparaître tout-à-fait ; on dit alors que le liquide *chante*, et qu'il ne tardera pas à bouillir.

Influence des substances dissoutes dans le liquide.—Le point d'ébullition d'un liquide n'est pas changé par des corps étrangers qui sont mécaniquement suspendus dans sa masse, comme les parcelles de sable dans l'eau ; mais il est toujours changé par les corps qui sont chimiquement combinés avec sa substance. Tous les sels solubles, par exemple, retardent le point d'ébullition de l'eau ; et un phénomène digne de remarque, c'est que la vapeur que donnent ces dissolutions est de la vapeur d'eau parfaitement pure, sans aucune trace des substances dissoutes.

M. Legrand a fait des expériences très-intéressantes sur ce sujet, et le tableau suivant contient les résultats auxquels il est parvenu.

TABLEAU

des

points d'ébullition de diverses dissolutions saturées

et des

proportions de sel correspondantes.

DÉSIGNATION DES DISSOLUTIONS.	POINTS d'ébullition en degrés centigrades.	QUANTITÉS de sel qui saturent 100 d'eau.
Chlorate de potasse	104°,2	61,5
Chlorure de barium	104,4	60,1
Carbonate de soude	104,6	48,5
Phosphate de soude	106.5	113,2
Chlorure de potassium	108,5	59,4
Chlorure de sodium	108,4	41,2
Hydrochlorate d'ammoniaque	114,2	88,9
Tartrate neutre de potasse	114,67	296,2
Nitrate de potasse	115,9	535,1
Chlorure de strontium	117,9	117,5
Nitrate de soude	121,0	224,8
Acétate de soude	124,37	209,0
Carbonate de potasse	135,0	205,0
Nitrate de chaux	151,0	362,2
Acétate de potasse	169,0	798,2
Chlorure de calcium	179,5	325,0
Nitrate d'ammoniaque	180,0	infini.

M. Legrand ne s'est pas borné à déterminer avec soin le point d'ébullition d'une dissolution d'eau saturée; mais il a aussi fait des expériences très-nombreuses et très-précises afin d'obtenir les proportions de sel qui sont nécessaires pour produire des retards d'ébullition de 1°, 2°, etc., jusqu'au point de saturation.

Le tableau suivant est en quelque sorte un résumé de son travail.

Tableau des retards des points d'ébullition.

Retard d'ébullition.	Nitrate d'ammoniac cristallisé.	Cholorure de calcium.	Acétate de potasse.	Nitrate de chaux.	Carbonate de potasse.	Acétate de soude.	Nitrate de soude	Cholorure de strontium.	Nitrate de potasse.	Tartrate neutre de potasse.	Sel ammoniac.	Chlorure de sodium.	Chlorure de potassium.	Phosphate de soude.	Carbonate de soude.	Chlorure de barium.	Chlorate de potasse.
deg.																	
1	10,0	10,0	10,5	15,0	13,0	9,9	9,3	16,7	12,2	26,9	7,8	7,7	9,0	23,0	14,4	19,6	14,6
2	20,5	16,5	20,0	25,3	22,5	17,6	18,7	25,2	26,4	47,2	13,9	13,4	17,1	42,8	26,7	32,5	29,2
3	31,3	21,6	28,6	34,4	31,0	23,1	28,2	32,1	42,2	65,0	19,7	18,4	24,5	60,6	36,8	44,5	43,9
4	42,4	25,8	36,4	42.6	38,8	30,5	37,9	37,9	59,6	82,3	25,2	23,1	31,4	76,8	44,7	56,0	58,5
5	53,8	29,4	43,4	50,4	46,1	36,7	47,7	43,4	78,3	100,1	30,5	27,7	37,8	91,8			
6	65,4	32,6	49,8	57,8	53,1	42,9	57,6	48,8	98,2	118,5	35,7	31,8	44,2	106,1			
7	77,3	35,6	55,8	64,9	59,6	49,3	67,7	54,0	119,0	137,3	41,3	35,8	50,5				
8	89,4	38,5	61,6	71,8	65,9	55,8	77,9	59,0	140,6	156,5	47,3	39,7	56,9				
9	101,9	41,3	67,4	78,6	71,9	62,4	88,3	63,9	163,0	176,1	53,5						
10	114,9	44,0	73,3	85,3	77,6	69,2	98,8	68,9	185,9	196,2	59,9						
11	128,4	46,8	79,3	91,9	83,0	76,2	109,5	74,1	209,2	216,8	66,4						
12	142,4	49,7	85,3	98,4	88,2	83,4	120,3	79,6	233,0	237,9	73,3						
13	156,9	52,6	91,4	104,8	93,2	90,9	131,3	85,3	257,6	259,5	80,5						
14	172,0	55,6	97,6	111,2	98,0	98,8	142,4	91,2	283,3	281,6	88,1						
15	188,0	58,6	103,9	117,5	102,8	107,1	153,7	97,5	310,2								
16	204,4	61,6	110,3	123,8	107,5	115,8	165,2	104,0	336,0								
17	221,4	64,6	116,8	130,0	112,3	125,1	176,8	110,9									
18	238,8	67,6	123,4	136,1	117,1	134,9	188,6										
19	256,8	70,6	130,1	142,1	122,0	145,2	200,5										
20	275,3	73,6	136,9	148,1	127,0	156,1	212,6										
22	314,0	79,8	150,8	160,1	137,0	179,3											
24	354,0	86,0	165,1	172,2	147,1	204,5											
26	396,0	92,2	180,1	184,5	157,3												
28	440,2	98,4	196,1	197,0	167,7												
30	487,4	104,6	213,0	209,5	178,1												
32	537,3	110,9	230,6	222,2	188,8												
34	590,0	117,2	248,7	235,1	199,6												
36	645,0	123,5	267,5	248,1													
38	705,5	129,9	287,3	261,3													
40	770,5	136,3	308,3	274,7													
42	840,6	142,8	330,8	288,4													
44	915,5	149,4	354,9	302,6													
46	995,5	156,2	380,6	317,4													
48	1081,5	163,2	407,9	333,2													
50	1173,5	170,5	436,9	351,2													
52	1273,0	178,1	467,6														
54	1383,0	186,0	500,0														
56	1504,0	194,3	534,1														
58	1637,0	203,0	569,9														
60	1775,0	212,1	607,4														
62	1923,0	221,6	646,6														
64	2084,0	231,5	687,6														
66	» » »	241,9	730,4														
68	» » »	252,8	775,0														
70	» » »	264,2															
72	» » »	276,1															
74	» » »	288,5															
76	» » »	301,4															
78	» » »	314,8															
80	infini.																

Lorsqu'un liquide est combiné avec un autre liquide, plus ou moins volatil que lui, il y a encore changement dans le point d'ébullition ; mais alors la vapeur qui se forme n'est souvent qu'un mélange, en diverses proportions, des vapeurs des deux liquides. Ainsi, l'alcool avance le point d'ébullition de l'eau, l'acide sulfurique le retarde, et, dans les deux cas, les vapeurs sont simplement mélangées, quoique les liquides soient chimiquement combinés.

Influence de la cohésion du liquide et de la nature du vase.— L'eau bout un peu plus tard dans un vase de verre que dans un vase de métal, et en même temps l'ébullition se fait par soubresauts très-violens ; d'autres liquides présentent des phénomènes analogues, et ces soubresauts paraissent d'autant plus violens que le liquide présente plus de cohésion et qu'il exerce sur la matière du vase une action moléculaire plus grande. Il suffit souvent de jeter dans un vase de verre un morceau de métal, ou quelques poudres métalliques, pour rendre l'ébullition très-régulière.

152. *De la rapidité de l'ébullition.* — La quantité de vapeur qui se forme par ébullition dépend de la quantité de chaleur que reçoit le liquide dans un temps donné, et cette quantité de chaleur dépend : 1° de l'activité du foyer ; 2° de la nature et de l'épaisseur des parois de la chaudière ; 3° de l'étendue de la surface liquide qui reçoit l'action du feu.

1° L'activité du foyer dépend de la disposition du fourneau et surtout de la nature du combustible ; car le bois, le charbon, la tourbe, la houille et l'anthracite ne donnent pas, à poids égal, la même quantité de chaleur, et ils ne sont pas non plus capables de produire la même température.

2° La surface extérieure de la chaudière peut être plus ou moins propre à recevoir l'action du feu et à absorber la chaleur qui la frappe, et nous verrons aussi que la nature des parois et leur épaisseur ont une influence considérable sur la quantité de chaleur qui peut les traverser dans un temps donné.

3° L'eau qui reçoit l'action du feu est celle qui touche les parois échauffées de la chaudière, et si chaque partie de ces parois fournit la même quantité de chaleur, il est évident que l'eau vaporisée dans un temps donné est proportionnelle à l'étendue de la chaudière que peut frapper la flamme. C'est ce qui est, en effet, confirmé par quelques expériences dont la précision est au moins suffisante pour la pratique; il paraît que dans les circonstances les plus favorables, avec un feu aussi vif qu'il soit possible, chaque mètre carré de la surface de *chauffe* peut vaporiser de 2 à 3 kilogrammes par minute; c'est du moins ce que l'on obtient dans les machines locomotives des chemins de fer, qui fonctionnent sous une pression de 4 à 5 atmosphères : mais, dans les machines fixes et à basses pressions, les chaudières sont particulièrement combinées pour l'économie du combustible, et l'on n'obtient en général, par minute, que $\frac{2}{3}$ de kilogramme de vapeur par mètre carré de surface de chauffe, en comptant comme surface de chauffe les portions qui ne reçoivent en quelque sorte que l'action de la fumée, aussi bien que celles qui reçoivent l'action vive et immédiate de la flamme.

153. *Table des points d'ébullition de divers liquides.*

	Degrés.	
Éther sulfurique	37,8	Gay-Lussac.
Soufre carburé	47,0	»
Alcool	79,7	»
Huile de térébenthine	157	
Phosphore	290	
Soufre	299	
Acide sulfurique	310	
Huile de lin	316	
Mercure	350	

154. Plusieurs liquides, mis en contact avec une surface chauffée jusqu'au rouge blanc, présentent ce phénomène singulier, qu'au lieu de s'agiter et de bouillir vivement, ils

se tiennent en repos et conservent leur volume, à-peu-près comme si la température était insuffisante pour l'ébullition.

Pour en faire l'expérience sur de petites masses, on fait chauffer un creuset de métal, et ensuite on y laisse tomber quelques gouttes d'eau : ce liquide s'arrondit alors comme le mercure sur le verre; il reste en repos pendant longtemps, ou bien il tourne sur lui-même d'un mouvement très-rapide; l'ébullition est nulle, et la diminution de volume insensible. Mais, si l'on retire le creuset pour qu'il se refroidisse, il arrive un moment près de la température du rouge brun, où tout à coup le liquide bout avec violence et se trouve projeté de toutes parts. L'eau chargée d'un alcali ou de quelques sels solubles devient incapable de produire ce phénomène; elle entre alors en ébullition dans un creuset rouge-blanc, comme dans un creuset qui est chaud sans être rouge.

Cette propriété se manifeste encore dans d'autres circonstances et sur des masses plus considérables : par exemple, une marmite à Papin, assez forte pour supporter la température rouge sans explosion, pourrait alors être débouchée sans donner naissance à un jet de vapeur considérable.

Ce résultat s'est présenté dans les *générateurs* de la machine à vapeur de Perkins. A la température rouge, on peut les percer de plusieurs ouvertures sans que la vapeur s'échappe, mais, à une température plus basse, la vaporisation s'opère et la vapeur s'élance avec une grande impétuosité. On pense en général que ce phénomène résulte d'une couche de vapeur qui se forme au contact de la surface métallique et qui empêche la chaleur de passer du métal au liquide, car il est évident que le liquide ne s'échauffe pas assez pour bouillir. Il se pourrait bien aussi que la chaleur pût alors traverser le liquide sans l'échauffer. Quoi qu'il en soit, cette propriété est fort curieuse, et mérite de nouvelles recherches.

155. *De l'évaporation.* — L'*évaporation* est la formation

de la vapeur à la surface libre des liquides, tandis que l'ébullition est, comme nous venons de le voir, la formation de la vapeur dans le sein de la masse. L'eau s'évapore à la surface des rivières, des lacs et des mers ; elle s'évapore à la surface de la terre, sur le sol et sur les plantes ; et il est évident qu'elle n'a pas alors une force élastique capable de vaincre la pression de l'air. Ainsi, les observations les plus communes nous font voir que la vapeur se forme sur l'eau à toutes températures, et qu'elle s'exhale dans l'air avec les plus faibles tensions. On avait d'abord présumé qu'une affinité chimique était nécessaire entre les molécules d'air et de vapeur pour que ce phénomène pût se produire ; mais nous avons vu qu'il n'est nul besoin de recourir aux forces chimiques : la vapeur, quelque faible que soit sa tension, se mélange avec l'air, comme deux gaz se mélangent entre eux. La seule condition pour qu'un liquide s'évapore est donc que les couches d'air qui l'environnent ne soient pas saturées de vapeur ; et comme il arrive, dans le mélange de deux gaz, que les molécules de l'un sont un obstacle mécanique à la diffusion des molécules de l'autre, il arrive aussi, dans l'évaporation, que l'air oppose une résistance à la diffusion de la vapeur. Ainsi, dans une atmosphère parfaitement calme, l'évaporation est lente, tandis que, dans une atmosphère agitée, elle devient de plus en plus rapide, à cause que les couches non saturées sont sans cesse ramenées en contact avec le liquide. Un vent sec, animé d'une vitesse infinie, en soufflant sur la surface d'un lac, y produirait une évaporation aussi instantanée que celle qui se produirait dans un vide infini, car les molécules de vapeur seraient emportées si vite qu'elles ne pourraient exercer aucune pression sur les molécules d'eau pour les empêcher de se vaporiser à leur tour.

La rapidité de l'évaporation n'est pas seulement dépendante de l'agitation de l'air ; elle dépend aussi de la tension de la vapeur ou plutôt de la différence qui existe entre la tension de la vapeur qui se forme et celle de la vapeur qui

est déjà formée dans l'air. Il résulte des expériences de Dalton, sur ce sujet, que la quantité de liquide qui peut se vaporiser dans un temps donné est toujours proportionnelle à cette différence de tension. Ainsi, dans un air parfaitement sec, à 11° de température, il se vaporiserait, à surface égale, autant d'eau à-peu-près qu'il s'en pourrait vaporiser à 30° dans un air humide contenant de la vapeur à 20 millimètres de tension.

Il est à peine nécessaire de remarquer que, toutes les autres circonstances étant les mêmes, la quantité d'eau qui s'évapore dans un temps donné est proportionnelle à l'étendue de la surface sur laquelle la vapeur prend naissance.

Les autres liquides s'évaporent à l'air libre, d'après les mêmes principes que l'eau; on peut dire seulement que, pour eux, la rapidité de l'évaporation est proportionnelle à la tension de la vapeur; car, en général, quand ils se vaporisent, il n'y a pas dans l'air de vapeur préexistante qui presse la surface liquide et retarde l'évaporation.

Nous verrons, dans la Météorologie, tous les phénomènes naturels qui résultent de la formation de la vapeur, de sa suspension dans l'atmosphère, et de sa condensation sous forme de pluie, de rosée, de gelée, etc.

156. *Du froid produit par la vaporisation.* — Quand un liquide est en ébullition à l'air libre, il conserve une température fixe, parce qu'il reçoit du foyer, par les parois du vase, autant de calorique que la vapeur en absorbe pour se former; quand l'ébullition se fait sous le récipient de la machine pneumatique, la température s'abaisse graduellement, parce qu'alors c'est à la masse liquide et aux corps environnans que la vapeur doit prendre le calorique latent nécessaire à sa formation. Nous verrons plus loin qu'un gramme de vapeur d'eau, en se formant par ébullition ou par évaporation, absorbe une quantité de chaleur latente, capable d'élever de 1° la température de 550 grammes d'eau liquide; ainsi, on peut juger de la rapidité avec

laquelle s'abaisse la température d'une masse liquide soumise à une ébullition spontanée ou à une prompte évaporation. Nous indiquerons les expériences les plus frappantes qui reposent sur ce principe.

Congélation de l'eau dans le vide. — On met sous le récipient de la machine pneumatique un large vase en verre, contenant de l'acide sulfurique; à quelques pouces au-dessus on dispose une capsule de métal très mince et très évasée, contenant quelques grammes d'eau : ordinairement cette capsule est portée par trois fils ou par trois bandes de métal très déliées, qui s'ajustent sur les bords du vase en verre. Après quelques coups de pistons, l'eau entre en ébullition; en continuant de faire le vide, l'ébullition cesse, et quand le vide est fait aussi complètement que possible, on attend quelques minutes; des aiguilles de glace paraissent dans la capsule, et bientôt après, toute l'eau qu'elle contient ne forme qu'une masse solide. Cette expérience curieuse est due à Leslie. L'acide sulfurique absorbe la vapeur d'eau à mesure qu'elle se forme, et détermine ainsi une évaporation plus prompte. Tout corps puissamment absorbant produit le même effet; la farine d'avoine, un peu torréfiée, réussit parfaitement. La capsule est très-mince, parce qu'elle doit participer au refroidissement, et on l'isole des corps voisins pour qu'elle n'en reçoive pas la chaleur (*figure* 226).

Une congélation, fondée sur les mêmes principes, peut se faire plus commodément avec l'appareil de la figure 203. C'est un tube contenant un peu d'eau que l'on fait bouillir pour faire le vide, et dont la partie supérieure est environnée d'un manchon dans lequel on verse un mélange réfrigérant.

Congélation du Mercure. — On peut pousser le refroidissement par évaporation au point de congeler le mercure. Pour cela on revêt d'une petite éponge ou de quelque tissu spongieux la boule d'un thermomètre et on l'humecte de carbure de soufre, ou, ce qui vaut mieux encore, d'acide sul-

fureux liquide; l'évaporation est si rapide, et la quantité de chaleur enlevée si considérable, que la colonne de mercure se précipite à — 10, — 20, — 30°, et, au bout de quelques instans, tout le mercure de la boule est congelé.

Le froid qui se fait sentir sur la main lorsqu'on y laisse tomber quelques gouttes d'un liquide volatil, et en général le froid qu'on observe à la surface des corps humides, sont des phénomènes résultant de la même cause.

Les *alcarazas*, dont on se sert en Espagne et ailleurs pour rafraîchir l'eau et les boissons spiritueuses, sont des vases poreux qui offrent à l'évaporation une grande surface humide. Le liquide intérieur s'infiltre à travers les parois; il s'évapore promptement dans un air un peu agité, et cette action se renouvelant sans cesse, le vase et le liquide qu'il contient sont maintenus par-là à une température de 10, 15 ou 20° au-dessous de la température ambiante.

Par une raison semblable, les plantes doivent être en général à une température plus basse que celle de l'air, car leurs tissus extérieurs font plus ou moins l'office d'alcarazas.

La transpiration abondante, et l'exhalation qui se fait sans cesse à la surface des corps vivans, sont pareillement une cause de refroidissement : nous verrons plus loin, en parlant de la chaleur animale, que le sang des animaux à sang chaud a une température fixe, qui ne peut s'élever ni s'abaisser sans les plus graves inconvéniens, et qui ne peut varier de quelques degrés sans que la mort s'ensuive. Pour l'homme, quel que soit le climat qu'il habite, cette température fixe est de 37°. Ainsi, sous la zône torride, où l'air s'élève souvent à des températures de 50°, les hommes vivent dans cette atmosphère brûlante, sans participer à sa température : l'activité de la transpiration est sans cesse proportionnée à l'énergie de la chaleur, et ces causes contraires se balancent avec tant d'harmonie que le sang d'un nègre reste à-peu-près à 37° comme le sang d'un Lapon.

LIVRE TROISIÈME.

MAGNÉTISME ET ÉLECTRICITÉ.

PREMIERE SECTION.

DU MAGNÉTISME.

CHAPITRE PREMIER.

De l'action des aimans sur eux-mêmes et sur les substances magnétiques.

157. On trouve dans le sein de la terre, et souvent même à la surface du sol, des substances qui ont la propriété d'attirer le fer : ces substances, quelle que soit leur forme ou leur composition, s'appellent des *aimans naturels;* autrefois on les appelait *pierres d'aimant*, parce qu'en effet elles offrent dans leur structure une apparence pierreuse plutôt qu'une apparence métallique. Il y a des aimans très-*faibles*, c'est-à-dire que, sous un grand volume, ils n'exercent sur le fer qu'une attraction peu sensible ; mis en contact avec de la fine limaille, ils peuvent à peine en soulever quelques parcelles : mais il y a aussi des aimans tellement *puissans* qu'ils sont capables de tenir suspendues des masses de plus de cinquante ou même de plus de cent kilogrammes.

Pour montrer la force attractive qui s'exerce entre le fer et l'aimant on peut faire les expériences suivantes :

1° Si l'on plonge un aimant, par une de ses extrémités,

dans de la limaille de fer, on voit les parcelles de métal s'attacher à sa surface et s'attacher les unes aux autres en formant une sorte de chevelure de plusieurs lignes de longueur : cette adhérence des particules entre elles et leur arrangement est un phénomène digne de remarque, sur lequel nous reviendrons ; pour le moment nous nous contenterons de le regarder comme une simple preuve d'attraction.

2° Si l'on présente à l'aimant, suivant son degré de force, des morceaux de fer plus ou moins volumineux, à peine en sont-ils approchés à quelques millimètres de distance qu'on les sent devenir plus légers : ils sont entraînés et se précipitent sur sa surface pour y rester suspendus ; il faut ensuite un effort plus ou moins considérable pour les en arracher.

3° Si l'on suspend une petite balle de fer à un fil flexible, et qu'on en approche peu-à-peu la surface de l'aimant, on voit ce petit pendule magnétique se dévier sensiblement de sa direction verticale. On peut même, de cette manière, reconnaître quelques caractères essentiels de cette force attractive, et constater : 1° qu'elle s'exerce à distance ; 2° qu'elle s'exerce au travers de l'air, au travers du vide, et au travers de tous les corps, pourvu qu'ils ne soient pas du fer ; 3° qu'elle diminue à mesure que la distance augmente.

Toutes les attractions étant réciproques, on doit conclure que si l'aimant attire le fer, il est attiré par lui avec la même énergie et suivant les mêmes lois. Cette vérité nécessaire peut, au reste, se vérifier directement par des expériences inverses des précédentes : en suspendant l'aimant pour le rendre mobile, et en faisant agir sur lui des morceaux de fer à diverses distances.

Cette force attractive étant distincte de toutes les autres forces naturelles, on lui donne un nom particulier, on l'appelle *force magnétique*, du mot μάγνης, qui était chez les Grecs le nom de la pierre d'aimant ; car les anciens avaient quelque connaissance de ses propriétés : Platon en parle dans plusieurs de ses dialogues, et il faut remonter jusqu'au

temps de Pythagore pour recueillir les premières notions qui nous aient été transmises sur ce sujet.

158. *Tout aimant a une ligne moyenne et deux pôles.* — Le fer semble être à l'égard de l'aimant ce que sont les corps pesans par rapport au globe de la terre : la masse du globe attire les corps dans tous les sens et les presse sur sa surface. Essayons de voir s'il en est de même de l'aimant, et si, de tous les points de son contour, il exerce une action pareille pour solliciter les parcelles de fer et pour les attirer vers son centre. Reprenons pour cela le *pendule magnétique*, c'est-à-dire la petite balle ou le petit fil de fer suspendu à un fil de soie. En tenant l'aimant à la même distance du pendule, on reconnaît bientôt que certains points de sa surface lui impriment une grande déviation, tandis que d'autres points ne produisent qu'une déviation nulle ou insensible ; il y a surtout deux régions opposées qui montrent une action très vive, et c'est sur l'intervalle qui les sépare que l'on aperçoit le moindre effet. On est conduit au même résultat en employant, pour cette expérience, soit un aimant naturel avec sa forme irrégulière, soit un aimant artificiel ayant la forme d'un cylindre ou d'un prisme allongé. Dans ce dernier cas la différence est plus frappante, et l'on voit sans peine que les sections transversales qui avoisinent le milieu de l'aimant n'agissent point sur le pendule, tandis que les parties extrêmes agissent avec une grande force. On peut donc sur la surface d'un aimant, et vers le milieu de sa longueur, tracer une ligne dont les points n'exercent aucune action attractive : c'est cette ligne que nous appelons *ligne neutre* ou *ligne moyenne ;* elle partage l'aimant en deux parties, que nous appelons les deux *pôles* de l'aimant. Ce même mot *pôle* sera pris encore dans deux autres acceptions différentes : nous nous en servirons pour désigner seulement les parties de la surface les plus éloignées de la ligne moyenne, et sur lesquelles l'attraction est la plus forte ; et nous nous en servirons aussi pour désigner un point idéal qui sera

conçu dans l'intérieur de l'aimant, à-peu-près comme le centre de gravité est conçu dans l'intérieur des corps, ou dans la masse du globe terrestre qui les attire : car une parcelle de fer n'est pas sollicitée seulement par le point de l'aimant auquel elle vient s'attacher, elle est sollicitée par toute la portion qui est d'un même côté de la ligne moyenne, et la résultante de toutes ces attractions est appliquée en un certain point que nous appellerons le pôle de cette portion de l'aimant. Il sera toujours facile de distinguer celle de ces trois acceptions dans laquelle nous entendrons que le mot *pôle* soit employé. Dans tous les cas, on voit qu'un aimant a une ligne moyenne et deux pôles.

Cette proposition fondamentale peut encore être démontrée par d'autres expériences plus faciles et plus décisives. Si l'on roule un aimant dans de la limaille de fer, il se couvre de filamens plus ou moins allongés qui montrent à l'œill 'inégale attraction des différens points de sa surface. Cet arrangement est représenté (*fig.* 228) pour un aimant naturel, et (*fig.* 229) pour un aimant artificiel. Aux extrémités *e* et *e'* les filamens de limaille sont très-longs et dressés perpendiculairement à la surface; sur les sections moins extrêmes, ils deviennent plus courts et commencent à s'incliner comme s'ils fuyaient les extrémités pour se rapprocher du milieu; enfin, sur la section moyenne *mm'*, aucune parcelle de limaille ne reste attachée, les filamens qu'on y voit prennent naissance de part et d'autre de cette ligne et semblent la franchir pour se joindre et s'appliquer sur la surface de l'aimant; *mm'* est la ligne moyenne; les deux moitiés *p* et *p'* sont les *pôles* de l'aimant : cette dénomination, comme il a été dit, s'appliquant parfois aux deux extrémités *e* et *e'*, où l'action est la plus forte : et d'autres fois aux deux points *p* et *p'*, que l'on peut regarder comme les centres de l'attraction.

On reproduit des effets analogues, en mettant sur un aimant une feuille de carton lisse, sur laquelle on laisse tomber de la fine limaille avec un petit tamis; par des chocs légers

que l'on imprime au carton, la limaille s'arrange en courbes régulières qui sont représentées (*fig.* 230) et qui dessinent la forme de l'aimant. Cette expérience fait voir, mieux encore que les précédentes, comment les filets de limaille, partant des deux côtés de la ligne moyenne *mm'*, passent sur cette ligne pour se rejoindre; elle offre aussi une preuve que l'attraction de l'aimant s'exerce au travers de la substance du carton.

Les aimans pouvant être brisés ou coupés suivant la ligne moyenne, il semble, au premier coup d'œil, que les deux portions qui en résultent doivent nécessairement échapper à la proposition dont il s'agit. On pourrait bien supposer que, séparées l'une de l'autre, elles perdent leur propriété magnétique; mais on n'imagine pas que, si elles en conservent quelque chose, elles puisssent avoir une ligne moyenne et deux pôles. L'expérience en est facile à faire. Nous verrons plus loin qu'avec de l'acier trempé très-dur on peut faire des aimans qui cassent comme du verre. Prenons un aimant de cette espèce, brisons-le suivant la ligne moyenne, et plongeons dans la limaille chacune de ces moitiés pour observer les modifications qu'elles ont éprouvées : nous trouverons, avec quelque surprise, que chacune d'elles est un aimant tout entier, ayant ses deux pôles et sa ligne moyenne au milieu. En les brisant de nouveau, les moitiés de ces moitiés présenteront les mêmes phénomènes, et l'on pourra pousser ces subdivisions aussi loin que l'on voudra, sans jamais trouver de limite à cette propriété : les derniers fragmens seront des aimans entiers, offrant, comme l'aimant primitif, une ligne moyenne et deux pôles. Nous verrons plus tard la raison de ce fait; mais il est bon de l'indiquer ici pour faire comprendre toute la généralité du principe dont il s'agit, et pour montrer ainsi l'impossibilité absolue où nous sommes de former un aimant qui n'ait qu'un seul pôle.

159. *Les pôles de même nom se repoussent, et ceux de noms contraires s'attirent.* — La figure 234 représente un

aimant suspendu horizontalement au moyen d'une chape de papier ou de métal et d'un fil sans torsion : à chacun de ses pôles *a* et *b* on présente successivement le même pôle d'un autre aimant pareil ; le pôle *a* est attiré, le pôle *b* repoussé ; et l'on dit que ces deux pôles *a* et *b* sont de *noms contraires*, parce qu'ils agissent en sens contraire sur le même pôle qui leur est présenté. Si les deux pôles de ce premier aimant sont de noms contraires, il est naturel de supposer que ceux du deuxième aimant sont pareillement de noms contraires, et qu'il en est de même de tous les aimans possibles. En effet, si l'on retourne ce deuxième aimant pour le faire agir par son autre pôle sur l'aimant suspendu, on reconnaît de suite que les pôles *a* et *b* éprouvent maintenant des effets contraires : *a* est repoussé, et *b* attiré ; donc, les deux pôles de l'aimant libre que l'on tient à la main sont aussi de noms contraires, puisque l'un attire ce que l'autre repousse, et *vice versâ*. Tout aimant libre présente le même phénomène. Nous appellerons *pôles de même nom* les pôles de différens aimans qui agissent de la même manière, soit sur le pôle *a*, soit sur le pôle *b* de l'aimant suspendu. Ces pôles une fois marqués sur plusieurs aimans afin de les bien reconnaître, que l'on suspende l'un de ces aimans pour faire agir les autres sur lui, et l'on verra que tous les pôles de même nom se repoussent, tandis que tous les autres qui sont de noms contraires s'attirent.

Ainsi, de part et d'autre de la ligne moyenne, dans les deux moitiés d'un aimant résident deux forces, qui d'abord nous semblaient identiques, parce qu'elles agissaient de la même manière sur le fer, et qui sont en réalité deux forces opposées, puisqu'elles agissent en sens contraire sur les aimans, l'une attirant ce que l'autre repousse. La ligne moyenne est la limite de ces deux forces antagonistes ; elle est le passage de l'une à l'autre, et c'est là ce qui rend raison de la neutralité qu'elle conserve.

160. *Les actions magnétiques peuvent être attribuées à un fluide particulier.* — Lorsqu'on cherche à remonter à

l'origine des forces qui produisent les phénomènes magnétiques, on reconnaît bientôt qu'elles ne sont pas, comme la pesanteur, une propriété inhérente à la matière pondérable. L'analyse chimique a démontré que les aimans naturels ne sont que des oxides de fer ou des mélanges d'oxides de fer à différens degrés de saturation; l'oxigène et le fer sont donc les seuls élémens pondérables qui entrent dans la composition de ces corps singuliers. Or, ni l'un ni l'autre de ces élémens n'ayant la propriété permanente d'exercer des actions pareilles aux actions magnétiques, il est peu probable que leurs molécules prennent en se combinant des propriétés essentielles qu'elles n'avaient pas avant leur combinaison; car, dans la matière pondérable, on n'observe jamais que la forme, l'arrangement ou la disposition des molécules, donne naissance à des forces nouvelles qui puissent s'exercer à des distances sensibles. D'une autre part, les forces inhérentes à la matière pondérable peuvent bien être augmentées, ou diminuées, ou modifiées de mille manières, mais elles ne peuvent jamais se détruire ou disparaître : tandis que, dans les aimans, les forces magnétiques ne paraissent qu'accidentellement, car elles peuvent être détruites et reproduites à volonté. On en donne la preuve en faisant chauffer un aimant jusqu'à la température rouge; par cette opération il ne perd rien de ses élémens matériels, et cependant il perd toutes ses propriétés magnétiques. Après le refroidissement, il est, en ce qui tient à la matière, tout-à-fait ce qu'il était auparavant : mais, en ce qui tient au magnétisme, il n'est plus rien absolument, car il n'exerce plus aucune action sur le fer. On peut ensuite, comme nous le verrons, lui rendre ses propriétés magnétiques sans rien lui donner et sans rien lui ôter de pondérable.

C'est par ces raisons, et par d'autres encore, résultant de l'ensemble des phénomènes, que l'on est conduit à regarder le magnétisme comme un fluide d'une espèce particulière, répandu dans la masse pesante de l'oxide de fer qui

constitue l'aimant. Et, puisque nous avons reconnu qu'il y a deux forces magnétiques opposées, nous devons conclure aussi qu'il y a deux fluides contraires, l'un qui *prédomine* dans l'un des pôles, et l'autre qui *prédomine* dans l'autre pôle. Dans tous les aimans, les pôles de même nom auront le même fluide prédominant, et, comme ils se repoussent, nous en conclurons que chaque fluide se repousse lui-même : les pôles de noms contraires auront des fluides différens, et, comme ils s'attirent, nous en conclurons que l'un des fluides attire l'autre. Ainsi, nous sommes conduits à ce résultat définitif qu'il existe deux fluides magnétiques, dont chacun se repousse et attire l'autre.

Ces fluides doivent pareillement exister dans le fer, car, s'ils sont distincts de la matière pondérable, on peut présumer que l'action qui s'exerce sur le fer ne s'exerce pas sur les molécules matérielles du fer, mais bien sur les fluides magnétiques contenus dans les intervalles de ces molécules. Nous avons donc quelque raison de chercher le fluide magnétique dans le fer, et de tenter les expériences qui peuvent nous faire découvrir son mode d'existence.

161. *Sous l'influence de l'aimant le fer devient lui-même un aimant.* — Pour démontrer cette propriété du fer, on peut disposer l'expérience comme elle est indiquée dans la *figure* 255: *f* est un cylindre de fer soutenu par un aimant *ab*; à son extrémité inférieure on présente de la limaille, qui s'y attache en forme de houppe, et qui reste suspendue aussi long-temps que le petit cylindre est lui-même suspendu à l'aimant : mais si on l'en détache, à l'instant toute la limaille tombe, et l'on n'observe plus aucune force attractive. Ce n'est pas la force de l'aimant qui agit à distance sur la limaille et la maintient suspendue, car si le petit cylindre n'était pas de fer, le phénomène ne se produirait pas; et l'on peut encore bien mieux s'en convaincre, en observant : 1° que les filets de limaille diminuent de longueur, à partir de l'extrémité du petit cylindre ; 2° qu'il y a un point vers la

partie supérieure où ils ne peuvent plus s'attacher, ce qui forme la ligne moyenne; 3° qu'au-dessus de ce point ils s'attachent de nouveau, en se dirigeant en sens contraire. Ainsi, le petit cylindre est bien véritablement un aimant, puisqu'il attire la limaille et qu'il a une ligne moyenne et deux pôles : seulement, sa ligne moyenne n'est pas au milieu.

Au lieu d'offrir de la limaille au cylindre suspendu, on lui donne un autre cylindre pareil, et il le peut porter (*fig.* 236); à celui-ci on en donne un troisième qu'il porte pareillement; à celui-ci un quatrième, et l'on forme ainsi une sorte de chaîne dont l'aimant est comme le principe et le premier anneau; si bien que le premier anneau manquant, toute la chaîne tombe et se brise, les autres anneaux n'ayant plus d'action pour se lier l'un à l'autre.

On peut démontrer la même chose en mettant le petit cylindre de fer dans le prolongement du barreau, sur une feuille de papier blanc (*fig.* 231). La limaille que l'on projette sur son contour s'y arrange régulièrement, et laisse voir en *mm'* une ligne moyenne qui sépare les deux actions contraires dont le cylindre de fer est maintenant animé, et, dès l'instant que l'on retire le barreau, la limaille n'a plus aucune tendance ni à s'arranger ni à conserver son arrangement primitif; ce qui prouve assez que le fer perd ses propriétés dès qu'il n'est plus sous l'influence de l'aimant. En modifiant cette expérience, on peut prouver que ce n'est pas seulement au contact que le fer reçoit de l'aimant la propriété magnétique, mais qu'il la reçoit à distance, comme on le voit dans la figure 232.

Ainsi le fer contient, comme l'aimant, les deux fluides magnétiques; mais, dans son état naturel, il les contient *combinés*, c'est-à-dire neutralisés l'un par l'autre. C'est pourquoi le fer n'agit pas magnétiquement sur le fer, car ce qui est attiré par l'un des fluides est repoussé par l'autre avec une force égale, et l'action définitive est tout-à-fait nulle. Au contraire, quand il est soumis à l'action de l'ai-

mant, ses deux fluides sont *décomposés* : l'un est attiré, l'autre repoussé ; une séparation s'opère entre eux : le premier afflue du côté de l'aimant ; l'autre afflue à l'extrémité opposée de la masse de fer, et là il devient prédominant au point d'attirer la limaille qu'on lui présente. Aimanter, c'est donc séparer les deux fluides magnétiques ; et désaimanter, c'est les réunir ou les recomposer. L'expérience suivante est très-propre à montrer ce double effet : un aimant horizontal *a b* (*fig.* 237) porte vers son extrémité une masse de fer *f* qui est à-peu-près la limite de ce qu'il peut porter ; au-dessus de *ab*, on présente un second aimant *a'b'* de même force, mais dont les pôles sont tournés en sens contraire ; on l'approche graduellement du premier, et bientôt le fer *f* se détache et tombe. Ainsi les deux aimans, pris ensemble, ne peuvent pas porter ce que chacun d'eux porterait aisément, et l'on en conçoit la raison : le second aimant détruit l'effet du premier en décomposant en sens inverse les fluides de la masse de fer *f*, tellement que, si ces deux aimans, ainsi retournés, étaient incorporés l'un dans l'autre, ils se désaimanteraient mutuellement, et le fer *f* conserverait tout-à-fait son état naturel.

Cependant le phénomène de décomposition des fluides magnétiques pouvant se produire de plusieurs manières, nous devons chercher à reconnaître si ces fluides éprouvent réellement dans la substance du fer un mouvement de translation par lequel ils passent d'une extrémité à l'autre de sa masse, ou s'ils n'éprouvent qu'un déplacement moléculaire.

162. *Le fluide magnétique ne passe pas de l'aimant au fer, ni même d'une molécule de fer à la molécule voisine.* — Avec un aimant on peut aimanter des morceaux de fer aussi long-temps et aussi souvent que l'on veut, sans qu'il perde rien de sa propriété attractive ; donc, par cette opération, l'aimant ne perd pas son fluide pour le donner au fer, puisqu'à la longue il finirait par s'épuiser. De plus, on peut remarquer qu'un morceau de fer qui devient aimant

pendant tout le temps qu'il touche un véritable aimant, ne conserve, quand on l'en sépare, aucune trace de ses propriétés magnétiques; donc il ne lui a rien pris, puisqu'il n'a rien gardé. Enfin, et cette observation est encore plus décisive, le cylindre de fer qui touche l'aimant ayant une ligne moyenne et deux pôles, c'est une preuve qu'il possède les deux fluides, et sans doute il n'en pourrait recevoir qu'un seul de l'aimant, si c'était l'aimant qui le lui donnât. Ainsi, le fluide magnétique n'est pas transmissible, c'est-à-dire qu'il ne passe pas d'un corps à un autre.

On pourrait penser que du moins il est dans le corps, comme dans un vase fermé de toutes parts, et que, s'il ne peut se transmettre au-dehors, il peut se déplacer au-dedans et se porter tantôt dans un point tantôt dans l'autre, et s'y accumuler suivant les forces qui le sollicitent. Cependant nous allons voir qu'il n'en est pas ainsi, car si l'on met un fil de fer en contact avec un aimant, et que l'on en coupe l'extrémité pendant que les fluides sont décomposés, l'un paraissant en haut et l'autre en bas, on ne retrouve pas la moindre trace de magnétisme dans la partie que l'on détache. Les apparences sont donc trompeuses, et il faut bien se garder de croire que le fluide magnétique puisse se décomposer comme le fluide électrique, et qu'il puisse voyager d'un bout à l'autre du fil qui le contient. Ce résultat semble un paradoxe inexplicable, mais, avec un peu d'attention, l'on peut concevoir, comme nous le démontrerons, que la décomposition magnétique a lieu dans chaque molécule séparément, que c'est dans cette petite étendue que le fluide peut se mouvoir, de telle sorte qu'il faudrait couper en deux une molécule elle-même pour pouvoir parvenir à isoler l'un de l'autre les deux fluides magnétiques. Voilà le principe des considérations par lesquelles nous pourrons expliquer le phénomène dont il s'agit, ainsi que le phénomène des aimans que l'on brise, et dont chaque moitié devient à l'instant un aimant entier.

163. *L'acier prend toutes les propriétés magnétiques des aimans.* — La limaille d'acier n'est guère moins attirable que la limaille de fer ; elle s'attache aux aimans, et forme aussi de petits filets ou de petites houppes d'une longueur très-sensible. Les fils d'acier qui n'ont d'épaisseur que quelques fractions de millimètre sont encore assez comparables aux fils de fer de même dimension ; seulement ils sont plus lents à recevoir l'action magnétique. Mais les morceaux d'acier d'un volume un peu considérable, et surtout les morceaux d'acier fortement trempés, présentent des propriétés tout-à-fait distinctes de celles du fer, car ils paraissent d'abord ne recevoir des aimans aucune espèce d'influence. On s'en assure en essayant de répéter, avec de petits cylindres d'acier trempé, l'expérience qui est indiquée dans la figure 236. Le premier cylindre ne pourra pas s'attacher à l'aimant, et il sera impossible de former avec l'acier la chaîne magnétique qui se forme si facilement avec le fer. Cependant, les petits fragmens d'acier étant attirables, il est naturel de supposer qu'en prenant du volume cette substance ne perd pas complètement sa sensibilité magnétique, et qu'il suffit seulement de quelques précautions pour la rendre apparente autant qu'elle doit l'être. En effet, que l'on mette l'acier en contact avec l'aimant, et que l'on maintienne ce contact pendant un quart d'heure ou une demi-heure, on observe alors un phénomène remarquable : ce corps, qui semblait au premier instant si insensible au magnétisme, devient magnétique avec le temps ; il prend de la force de plus en plus, et à la fin il est attiré aussi puissamment que le fer. On peut même par un autre moyen suppléer au temps qui paraît nécessaire pour développer sa force ; ce moyen consiste à exercer plusieurs *touches*, c'est-à-dire plusieurs frictions dans *le même sens* sur toute la longueur du morceau d'acier, soit en le faisant passer sur l'aimant, soit en faisant passer l'aimant sur lui. Par exemple, en traitant de la sorte les petits cylindres dont nous

parlions tout à l'heure, et sur lesquels l'aimant n'avait pas de prise, on les voit, après quelques frictions, s'attacher à sa surface, s'attacher l'un à l'autre, et former enfin une chaîne magnétique qui se prolonge comme celle des cylindres de fer. Le premier caractère de l'acier trempé est donc d'exiger, pour devenir magnétique, ou un contact prolongé avec un aimant, ou des frictions répétées. Un second caractère, très digne de remarque, c'est qu'après ces opérations il conserve *pour toujours* le magnétisme qu'il a pris. Pour preuve de cette vérité, il suffit de rouler dans la limaille l'acier qui a été *touché* par un aimant : on y reconnaît alors une ligne moyenne et deux pôles, et, en un mot, toutes les propriétés qui distinguent les aimans ; qu'on l'essaie encore après un jour ou un mois, ou même après des années, on verra qu'il n'a rien perdu de sa force; enfin que l'on mette en présence, pour les faire agir l'un sur l'autre, les pôles de même nom de ces *aimans artificiels*, ou leurs pôles de noms contraires, on verra que les premiers se repoussent, et que les autres s'attirent exactement comme le font les pôles des aimans naturels.

Du premier caractère que présente l'acier, c'est-à-dire de la lenteur avec laquelle il cède à l'action des aimans, on conclut qu'il y a dans sa substance une force ou plutôt une sorte de résistance qui s'oppose à la séparation immédiate de ses fluides magnétiques, et cette force, on l'appelle *force coercitive*. Du second caractère qu'il présente, c'est-à-dire de la faculté avec laquelle il conserve le magnétisme qu'il a pu recevoir, on conclut qu'il y a aussi dans sa substance une force ou une résistance qui s'oppose à la réunion des deux fluides séparés; car les fluides contraires s'attirent et tendent sans cesse à se recomposer ou à se neutraliser, et, s'il n'y avait pas une force qui s'y opposât, les deux fluides se recomposeraient en effet, et l'acier retomberait à l'état naturel dès qu'il serait séparé de l'aimant qui exerce sur lui son action décomposante. Cette résistance

à la recomposition des fluides s'appelle encore *force coercitive*, comme la résistance à leur séparation : on n'est pas sûr toutefois que la force coercitive qui s'oppose à la séparation des fluides soit identique à la force coercitive qui s'oppose à leur réunion.

L'acier est peut-être de tous les corps de la nature celui qui peut passer par les arrangemens moléculaires les plus variés, sans qu'il y ait des différences sensibles dans sa composition chimique. Par différens degrés de trempe ou de recuit, on peut en effet donner au même morceau d'acier les propriétés les plus différentes, les plus opposées ; on peut en faire des ressorts parfaitement élastiques, des tiges malléables comme du fer, des limes, des burins, ou d'autres instrumens qui sont fragiles comme du verre; aux différens états correspondent des forces coercitives différentes, et la trempe la plus raide, c'est-à-dire celle qui rend l'acier dur et cassant, est en général, celle qui lui donne la force coercitive la plus grande.

Le fer prend lui-même un peu de force coercitive lorsqu'il est battu, tordu ou écroui : mais, pour le distinguer, nous appelons *fer doux* celui qui n'a point de force coercitive.

Il résulte de ce qui précède que nous pouvons fabriquer des aimans tout-à-fait pareils aux aimans naturels, et nous en tirons avantage pour varier à volonté les dimensions et les formes, et les approprier à nos recherches. Les aimans artificiels prennent des noms différens. Une *aiguille aimantée* (*fig.* 238) a, en général, la forme d'un losange. Elle est destinée, tantôt à être posée sur un pivot d'acier très-aigu, au moyen d'une chape en agate *c*; tantôt à être suspendne par un fil de soie d'un seul brin, ou par un assemblage de fils de soie sans torsion. Quelquefois l'aiguille aimantée est un simple fil d'acier, un cylindre ou un prisme allongé. Quand les dimensions de l'aiguille sont un peu considérables, soit en longueur soit en épaisseur, il ne suffit plus de la passer sur l'aimant pour lui donner tout le magné-

tisme qu'elle peut recevoir; il faut recourir alors à des procédés particuliers que nous ferons connaître en détail dans le chapitre de l'Aimantation.

Une aiguille de grandes dimensions s'appelle un *barreau aimanté*, ou simplement un *barreau*.

La réunion de plusieurs aiguilles ou de plusieurs lames aimantées ayant toutes les pôles de même nom tournés dans le même sens, forme un *faisceau aimanté* ou un *faisceau magnétique*.

164. *Des diverses substances magnétiques et de leur force coercitive.* — Puisque les fluides magnétiques ne sont pas transmissibles, puisqu'ils restent en quelque sorte inhérens aux molécules pondérables des corps dans lesquels ils se trouvent, il en résulte évidemment que les corps simples magnétiques doivent conserver leurs propriétés d'une manière plus ou moins apparente au milieu des diverses combinaisons dont ils peuvent faire partie. Ainsi, l'on peut s'attendre à retrouver dans toutes les substances ferrugineuses des traces de magnétisme d'autant plus sensibles que le fer y entrera en plus grande proportion; c'est en effet ce qui arrive : cependant le peroxide de fer, le persulfure de fer, et d'autres composés dans lesquels la proportion de fer est petite, ne sont plus magnétiques à la manière du fer, de l'acier et de l'aimant, sans qu'il soit possible, quant à présent, d'assigner la cause précise de ce phénomène. Le nikel, le coblat, le chrôme et le manganèse, sont les seuls corps simples qui jouissent avec le fer de la propriété d'être magnétiques, et cette propriété se trouve même complètement dissimulée dans la plupart des composés chimiques dont ils font partie.

165. *Moyen de reconnaître si une substance est simplement magnétique ou si elle est aimantée.* — Un corps aimanté a nécessairement des pôles différens, car nous avons déjà dit qu'il est impossible d'isoler un des pôles d'un aimant, et par conséquent d'isoler un des fluides; les pôles de noms contraires ayant une action contraire sur le même

pôle d'une aiguille aimantée, il suffira donc de présenter tous les points d'un corps au même pôle d'une aiguille pour reconnaître son état : si l'action est toujours nulle, le corps n'a point de magnétisme sensible ; si elle est toujours attractive, le corps est simplement magnétique; si elle est attractive pour quelque point et répulsive pour d'autres, le corps est aimanté, il y a deux pôles et une ligne moyenne dont on peut trouver la trace.

Il arrive quelquefois qu'un même corps présente plus de deux pôles; alors on dit qu'il a des *points conséquens*. Par exemple, l'aiguille représentée dans la figure 233 offre deux points conséquens : l'un en *a'*, l'autre en *b'*. Pour en reconnaître la présence, il suffit de la faire agir sur une petite aiguille d'épreuve comme celle de la figure 252. Celle-ci étant horizontale, on approche l'autre aiguille verticalement, et on la fait monter ou descendre de manière que tous ses points passent successivement devant le même pôle de l'aiguille mobile. S'il n'y a pas de point conséquent, on n'observe qu'une attraction et une répulsion. S'il y a un point conséquent, on observe deux alternatives : par exemple, une attraction d'abord, puis une répulsion, puis une autre attraction. S'il y a deux points conséquens, on observe trois alternatives, etc.; car, dans un aimant qui présente des points conséquens, chaque pôle touche toujours à un pôle de nom contraire, et les alternatives d'attraction et de répulsion se suivent régulièrement.

Les points conséquens peuvent encore être rendus visibles, soit en plongeant l'aimant dans la limaille, soit en le mettant sous une feuille de carton ou de papier sur laquelle on tamise de la limaille très-fine. C'est la seconde de ces expériences qui est représentée dans la figure 233. Nous verrons plus loin comment les pôles multiples peuvent s'établir dans les aiguilles, et comment on peut les faire disparaître et les éviter : ce qui est d'une grande importance dans la construction des boussoles.

CHAPITRE II.

De l'action magnétique de la Terre.

166. *Direction des aimans. — Déclinaison. — Inclinaison.* — Une aiguille aimantée, suspendue horizontalement par un fil de soie, ou posée sur un pivot, n'est pas en équilibre dans toutes les positions; mais elle prend une direction déterminée vers un point de l'horizon, et, si on l'en écarte, elle y revient par une série d'oscillations plus ou moins rapides. La force qui la rappelle est une force magnétique, car une aiguille non aimantée n'éprouve rien de pareil. Cette propriété remarquable des aiguilles aimantées se reproduit partout : dans toutes les contrées de la terre, sur tous les continens et sur toutes les mers, au sommet des plus hautes montagnes comme dans les mines les plus profondes, partout l'aiguille aimantée prend une direction fixe à laquelle elle revient lorsqu'on l'en écarte. Il y a donc une force magnétique qui fait sentir ses effets dans tous les points du globe terrestre; car on ne peut pas admettre que les aimans se dirigent eux-mêmes, comme on ne peut pas admettre que les corps se donnent eux-mêmes du mouvement : dans un cas comme dans l'autre, il faut le concours d'une force extérieure.

Nous pouvons reconnaître, par une expérience facile, que cette force a le caractère essentiel de la force qui émane d'un aimant et non pas de celle qui émane d'une masse de fer : car si l'on renverse les pôles de l'aiguille en la retournant *bout-à-bout*, elle n'est plus en équilibre dans cette nouvelle position, elle fait une pirouette, et décrit d'un côté ou de l'autre toute la demi-circonférence qui l'écarte de sa direction primitive. Donc, la force directrice distingue les pôles, et, semblable aux aimans, elle agit par attraction

sur l'un et par répulsion sur l'autre, tandis que le fer attire l'un ou l'autre sans distinction et avec la même énergie.

Où se trouve le centre de cette action magnétique, si universellement répandue sur tous les points de la terre ? C'est une question qui paraît difficile à résoudre, et qui fut autrefois un grand sujet de discussion parmi les Physiciens. Les uns mettaient, avec Cardan, le siége de cette force dans une petite étoile qui forme la queue de la grande-ourse; les autres le plaçaient au pôle du zodiaque ; et même il y en eut qui, trouvant sans doute le ciel trop étroit, imaginaient par-delà les cieux et les étoiles un centre attractif d'où arrivait à la terre la force qui dirige les aimans. Mais Gilbert, le premier fondateur de la science du magnétisme et de l'électricité, mit un terme à toutes ces vaines hypothèses en démontrant, autant qu'on pouvait le faire à son époque, que le globe de la terre est magnétique, et que c'est son action qui dirige l'aiguille aimantée (1).

En discutant les observations qui ont été faites dans les différens climats, nous serons en effet conduits, par leur ensemble, à regarder la terre comme un vaste aimant dont la ligne moyenne est située dans les regions équatoriales. On en tire un moyen de caractériser et de définir les deux fluides magnétiques : on appelle *fluide boréal* celui qui domine dans l'hémisphère boréal de la terre, et *fluide austral*

(1) Gilbert écrivait vers la fin du seizième siècle, et son traité *de Magnete magneticisque corporibus, et magno magnete Tellure,* est un vrai modèle d'invention et de sagacité. Voici ce qu'il dit au troisième livre de cet ouvrage, chap. 1, p. 116 de l'édition de 1628, en parlant des aiguilles qui se dirigent : *Nunc verò harum rerum causæ et admirabiles efficientiæ, anteà conspicuæ, sed non demonstratæ, nobis aperiendæ sunt. De hisce conversionibus qui ante nos scripserunt omnes, tam breviter, tam jejunè et ancipiti judicio, opiniones suas tradiderunt, ut nemini vix unquàm persuadere, nedum ipsis satisfacere posse videantur, et à prudentioribus, omnes eorum ratiuncluæ, tanquàm inutiles, incertæ, et absurdæ, nullis demonstrationibus aut argumentis suffultæ, rejiciuntur, undè et neglecta magis incomprehensa exulavit magnetica scientia.*

celui qui domine dans l'hémisphère austral; et puisque ce sont les fluides de noms contraires qui s'attirent, il en résulte que c'est le pôle *austral* d'une aiguille qui se dirige vers le *nord* et son pôle *boréal* vers le *sud*.

Dans le même lieu les aiguilles aimantées, qui sont assez distantes pour ne pas réagir l'une sur l'autre, prennent des directions sensiblement parallèles : mais, sur des points de la terre qui sont éloignés de quelques degrés en longitude ou en latitude, ce parallélisme n'existe plus; il importe par conséquent de pouvoir définir la direction de l'aiguille aimantée, c'est-à-dire de pouvoir la rapporter à des lignes connues et invariables, afin de reconnaître dans le même lieu quels sont les changemens que cette direction éprouve avec le temps, et quels sont les rapports qui existent entre les directions que l'on observe dans les lieux différens. Voici à cet égard quelques définitions géométriques qu'il importe de bien saisir.

Le *méridien magnétique* est le plan qui passe par le centre de la terre et par la direction de l'aiguille horizontale, ou simplement la *trace* que ferait ce plan sur la surface de la terre. On sait que le *méridien terrestre* ou le *méridien astronomique* d'un lieu est le plan qui passe par ce lieu et par l'axe de la terre, et que la *ligne méridienne*, ou simplement la *méridienne*, est la *trace* de ce plan sur la surface terrestre. Le méridien magnétique et le méridien astronomique sont deux plans verticaux, puisqu'ils passent l'un et l'autre par la verticale du lieu pour lequel on les considère, mais ces deux plans verticaux peuvent faire entre eux un angle plus ou moins grand.

La *déclinaison* de l'aiguille aimantée est dans chaque lieu l'angle que fait le méridien magnétique avec le méridien astronomique, ou, ce qui revient au même, l'angle que la direction de l'aiguille horizontale fait avec la méridienne. La déclinaison est *orientale* quand le pôle austral de l'aiguille passe à l'est de la méridienne, et *occidentale* quand

il passe à l'ouest. Par exemple, *sn* (*fig.* 243) est la méridienne de l'Observatoire de Paris, et *ab* la direction de l'aiguille horizontale au même lieu : la déclinaison est occidentale, et se trouve à présent d'environ 22°, car nous verrons qu'elle change avec le temps. Il y a des lieux sur la terre où l'aiguille se dirige exactement suivant la méridienne : pour ces lieux la déclinaison est nulle, et l'ensemble des points successifs dans lesquels ce phénomène se présente forme ce qu'on appelle des *lignes sans déclinaison*. Nous verrons que d'un pôle à l'autre il existe au moins deux lignes sans déclinaison, qui traversent les mers et les continens dans des directions tout-à-fait sinueuses et irrégulières.

Tout appareil propre à observer la déclinaison s'appelle *boussole de déclinaison*. Dans nos climats et presque par toute la terre, l'aiguille de déclinaison se rapprochant plus des points cardinaux du nord et du sud que de l'est et de l'ouest, on dit communément qu'elle se dirige vers le nord.

L'*inclinaison* est l'angle que fait avec l'horizon une aiguille qui peut se mouvoir librement autour de son centre de gravité dans le plan vertical du méridien magnétique. Concevons une aiguille *a c b* (*fig.* 240), mobile autour d'un axe central *c* et pouvant parcourir toute une circonférence dans le plan vertical *z c h* : si ce plan de rotation coïncide avec le méridien magnétique, l'angle *a c h* sera l'inclinaison du lieu. A Paris, l'inclinaison est d'environ 70°, et c'est le pôle austral qui plonge au-dessous de l'horizon. L'aiguille, il est vrai, fait avec l'horizon quatre angles, qui sont égaux, deux à deux : mais l'on convient toujours de prendre pour l'inclinaison le plus petit des deux angles qu'elle forme, et même, pour fixer les idées, le plus petit des angles que forme sa partie inférieure ; ainsi, l'inclinaison est toujours plus petite que 90°.

Les appareils propres à observer l'inclinaison s'appellent *boussoles d'inclinaison*.

Si, par exemple, on part de Paris avec un appareil de

cette nature pour s'avancer vers le pôle boréal de la terre, on observe que l'inclinaison augmente en même temps que la latitude, et il y a quelque part dans ces parages, à une certaine distance du pôle de rotation de la terre, un point où l'aiguille d'inclinaison est exactement verticale, et où l'inclinaison est par conséquent de 90°; ce point est le *pôle magnétique* boréal de la terre.

Au contraire, si l'on part de Paris pour s'avancer vers le pôle austral de la terre, l'inclinaison diminue avec la latitude, et, lorsqu'on arrive dans la zône équatoriale, on trouve un certain point où l'inclinaison est tout-à-fait nulle, c'est-à-dire où l'aiguille d'inclinaison est exactement horizontale. En passant outre, on retrouve une autre inclinaison; mais alors c'est le pôle boréal de l'aiguille qui plonge au-dessous de l'horizon, et qui plonge de plus en plus à mesure que la latitude australe augmente. Il y a donc, vers le pôle austral de la terre, un autre point où l'aiguille d'inclinaison se relèverait exactement dans la direction du fil-à-plomb, son pôle boréal en bas et son pôle austral vers le zénith, et ce point, dont la position précise est encore inconnue, est le *pôle magnétique austral* de la terre.

Quel que soit le méridien sur lequel on traverse la zône équatoriale, on trouve toujours un point où l'aiguille est horizontale, et la série de ces *points sans inclinaison* forme autour de la terre une courbe que l'on appelle *l'équateur magnétique*. Cette courbe est régulière dans une partie de son cours, et alors elle suit très-sensiblement la direction d'un grand cercle qui serait incliné à l'équateur terrestre, de 12° à 13°, et qui le couperait, d'une part, à l'ouest de la côte occidentale d'Amérique, vers l'île Galego, et, d'une autre part, vers la côte occidentale d'Afrique, en s'inclinant du côté du sud, dans la partie de l'Océan atlantique qui sépare ces deux points. Mais des observations répétées indiquent en même temps que l'équateur magnétique éprouve dans la mer du Sud, entre les îles Sandwich et les Iles-des-

Amis, des sinuosités nombreuses dont il est difficile de rendre compte.

167. *L'action magnétique que la terre exerce sur une aiguille aimantée peut être représentée par un couple, c'est-à-dire par un système de deux forces égales parallèles et opposées.* — Concevons, en effet, une aiguille aimantée *amb* (*fig.* 245) dont la ligne moyenne soit en *m*, et remarquons d'abord que le fluide austral libre qui est répandu dans la longueur *am* est toujours égal en quantité au fluide boréal libre qui est répandu dans la longueur *mb*; car ces deux fluides résultent du fluide naturel décomposé, et, en se combinant de nouveau, ils se neutraliseraient exactement. Si nous considérons maintenant l'action totale que le fluide boréal de la terre exerce sur l'aiguille, il est évident qu'elle se réduit à un couple, car, à distance égale, la somme des attractions qu'il exerce sur le fluide austral de *ma* est égale et opposée à la somme des répulsions qu'il exerce sur le fluide boréal de *mb*, et l'aiguille est si petite, par rapport à la distance qui la sépare du fluide boréal disséminé dans l'hémisphère terrestre, que les deux actions dont il s'agit sont rigoureusement parallèles. Ce que nous venons de dire du fluide boréal terrestre s'applique au fluide austral; donc, à la surface de la terre, une aiguille est sollicitée par deux couples qui se réduisent en un seul par la composition des forces parallèles; donc, enfin, l'action terrestre peut être représentée par un seul couple.

Il en résulte que la force magnétique de la terre n'est ni une force attractive ni une force répulsive, mais seulement une force directrice, incapable d'imprimer aux aimans un mouvement quelconque de translation.

Cette conséquence peut être vérifiée par plusieurs expériences :

1° Une aiguille aimantée, flottante sur l'eau au moyen d'un léger morceau de liége, prend la direction du méridien magnétique, mais elle n'éprouve ensuite aucun glissement

sur la surface de l'eau ; ce qui prouve bien que la répulsante des actions terrestres ne peut donner aucune composante horizontale.

2° Une aiguille aimantée est équilibrée (*fig.* 241) sur une planchette horizontale suspendue à un fil sans torsion, et, dans cet état, elle se dirige encore exactement dans le méridien magnétique ; ce qui ne pourrait avoir lieu si elle était sollicitée par une force horizontale attractive ou répulsive.

3° Une aiguille d'acier ne prend pas la moindre augmentation, ni la moindre diminution de poids lorsqu'on l'aimante ; or, elle éprouverait nécessairement un changement de poids si la force terrestre avait une résultante verticale attractive ou répulsive.

Les deux points où se trouvent appliquées dans une aiguille les deux forces égales parallèles et opposées qui constituent le couple terrestre, sont les véritables *pôles* de l'aiguille ; leur position dépend de la distribution du magnétisme, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, mais, dans tous les cas, il faut que la ligne qui les joint soit exactement dirigée dans le plan du méridien magnétique pour que l'aiguille horizontale se trouve en équilibre ; c'est donc la direction de cette ligne qui donne la véritable direction de l'aiguille aimantée : or, comme la *ligne des pôles* qui est l'axe magnétique peut ne pas coïncider avec la *ligne des pointes* qui est l'axe de figure, il est essentiel de se mettre à l'abri de cette cause d'erreur ; on y parvient par la méthode suivante, que l'on appelle la *méthode du retournement.*

Soit une aiguille horizontale $efgh$ (*fig.* 244), dont les pôles sont irrégulièrement placés, l'un en a, l'autre en b ; dans sa position d'équilibre son axe de figure iu fera, par exemple, avec la ligne méridienne du lieu un angle icn, tandis que son axe magnétique fait un angle akn : si l'on retourne les faces sans retourner les pôles, et qu'on l'abandonne de nouveau à elle-même, elle s'arrêtera dans la position $e'f'g'h'$ de manière que l'axe $a'b'$ soit parallèle à ab, car telle est la

condition d'équilibre; alors l'axe de figure $i'u'$ fait avec la méridienne un angle $u'cn$ beaucoup plus grand que tout-à-l'heure, tandis que l'axe magnétique fait le même angle; et il est facile de voir que la moyenne des angles ucn et $u'cn$ est précisément l'angle mcn, c'est-à-dire la déclinaison cherchée. C'est ainsi qu'il faut toujours observer la déclinaison par la *méthode du retournement*, sous peine de commettre des erreurs qui s'élèvent ordinairement à plusieurs degrés.

La *direction* de la force magnétique de la terre est maintenant facile à définir et à trouver, car elle coïncide avec la direction de l'aiguille d'inclinaison qui est en équilibre dans le plan du méridien magnétique. En effet, quand cette force agit seule sur une aiguille, elle ne peut la laisser en repos qu'après en avoir amené l'axe ou la ligne des pôles dans sa propre direction; et, pour qu'elle agisse seule sans être combattue ni par la pesanteur ni par aucune résistance, il faut que l'aiguille soit suspendue par son centre de gravité, et qu'elle puisse se mouvoir dans le plan du couple : double condition qui se trouve remplie dans la boussole d'inclinaison, lorsqu'elle est bien faite et lorsqu'elle est exactement tournée dans le plan du méridien magnétique. Cette direction étant une fois définie, nous allons faire connaître les instrumens qui servent à l'observer, savoir : la boussole de déclinaison, la boussole d'inclinaison et la boussole des variations diurnes.

168. *Boussole de déclinaison.* — Cet instrument est représenté dans les figures 259, 260, 261 et 262.

gg' (*fig.* 262) est l'aiguille de la boussole; ses pôles sont en a et b; vers son centre elle est percée d'une ouverture t, de 7 à 8 millimètres de diamètre, afin qu'elle puisse facilement être soumise à la méthode du retournement; elle est équilibrée d'elle-même sans contre-poids, et par conséquent elle ne pourrait plus se tenir horizontale si elle était désaimantée.

cc' (*fig.* 261) est une coupe de la chape en agate. Cette

pièce doit être travaillée avec un grand soin : surtout à son sommet intérieur, où est la petite surface courbe qui doit poser sur la pointe du pivot *p* ; et à son contour extérieur, où vient s'ajuster l'ouverture centrale de l'aiguille.

Le pivot *p* a sa pointe travaillée sous un angle de 15 à 20°. L'anneau *aa'* est destiné à soulever la chape de l'aiguille, soit pour décharger le pivot quand l'appareil n'est pas en expérience, soit pour arrêter des oscillations d'une trop grande amplitude. La tige de cet anneau se prolonge jusqu'à l'extérieur de la boîte, où elle s'ajuste à un bouton qui l'élève ou qui l'abaisse à volonté.

La figure 260 représente la coupe de la boussole.

gg' est l'aiguille ;

dd' un cercle divisé sur lequel on lit la division correspondante aux extrémités de l'aiguille ;

bb' le bord de la boîte, qui est en cuivre rouge comme tout le reste de l'appareil ;

vv' le verre qui ferme la boîte pour éviter l'agitation de l'air ;

xy un axe solide qui fait corps avec le fond de la boîte, et qui peut tourner sur son extrémité conique inférieure dans une petite cavité de la vis *w*.

Cette rotation emporte l'axe, la boîte et toutes les pièces adhérentes ; mais, en même temps, le pied de l'instrument reste fixe, ainsi que le cylindre *ll'*, qui enveloppe l'axe *xy* et qui est destiné, au moyen de six rayons tels que *o r* et *o'r'*, à porter le cercle divisé *zz'* que l'on appelle *cercle azimuthal*.

Deux nonius, diamétralement opposés, dont l'un est représenté en *n* (*fig.* 259), sont fixés sur le bord de la boîte pour tourner avec elle, et pour marquer de quel angle elle tourne, soit en partant du zéro soit en partant d'une division donnée du cercle azimuthal.

Les vis calantes *vv'* servent à rendre l'appareil horizontal au moyen du niveau *n'*.

tt' (*fig.* 259) est une lunette : elle est portée sur un axe de rotation *ee'*, parallèle au cercle des azimuths, et dont le milieu est dans la verticale du pivot. On remplit cette condition au moyen des petites vis qui terminent le montant *m'*. Dans son mouvement de rotation, la lunette emporte un nonius *i s* (*fig.* 259) qui parcourt l'arc divisé *uu'*, et qui donne immédiatement l'angle de rayon visuel avec l'horizon.

Pour observer la déclinaison au moyen de cet instrument, on le dispose horizontalement, on fait tourner la boîte pour amener dans le champ de la lunette un astre connu dont on observe la hauteur; en même temps, on lit la division correspondante du cercle de l'aiguille et celle du cercle des azimuths, ce qui donne l'angle du méridien magnétique avec le vertical de l'astre au moment de l'observation. Il reste ensuite à trouver, par les méthodes astronomiques, l'angle vertical de l'astre avec le méridien du lieu pour en déduire la déclinaison. Si l'aiguille de la boussole n'est pas éprouvée d'avance, et si l'on ne connaît pas sur elle l'influence du retournement, il est nécessaire de faire une seconde observation après l'avoir retournée, comme nous l'avons dit précédemment.

Pour donner une idée des changemens qu'éprouve la déclinaison, nous réunirons, dans le tableau suivant, les observations qui ont été faites à Paris à diverses époques.

Déclinaisons observées à Paris.

années.	déclinaisons.	années.	déclinaisons.
1580	11° 30' est.	1816	22° 25' ouest.
1618	8	1817	22 19
1663	0	1823	22 23
1678	1 30 ouest.	1824	22 23
1700	8 10	1825	22 22
1780	19 55	1827	22 20
1785	22 00	1828	22 5
1805	22 5	1829	22 12
1813	22 28	1832	22 3
1814	22 34	1835	22 4

On voit, 1° que, depuis 1580, la déclinaison a varié de plus de 30°;

2° que c'est en 1663 qu'elle a été nulle ;

3° que sa marche a été sensiblement progressive vers l'ouest depuis les premières observations jusqu'en 1814 ;

4° que, depuis cette époque, elle semble éprouver un mouvement rétrograde vers l'orient.

La *boussole marine* ou *compas de variation* n'est autre chose qu'une boussole de déclinaison ; seulement elle est suspendue de manière à se maintenir, au milieu de l'agitation de la mer, dans une situation sensiblement horizontale. Les figures 263 et 264 représentent une vue et une coupe de cet instrument.

bb' bords de la boîte dont le fond est en *ff*.

v, verre qui la ferme.

p, pivot qui s'élève ou s'abaise au moyen de la vis *w*.

gg', aiguille dont la chape est en *c*.

rr', feuille mince de papier, doublée d'une feuille de talc ou de quelque autre substance légère et rigide. Ces feuilles forment ce qu'on appelle la *rose des vents* ; elles sont attachées ou collées à l'aiguille pour se mouvoir avec elle. La rose est un cercle dont le centre est dans la verticale du pivot, et dont la circonférence porte à la fois des divisions en degrés et les signes des vents.

pp', deux pinnules, la première ayant une fente étroite, et la seconde une large fente au milieu de laquelle on fixe un fil vertical.

m, miroir à faces bien parallèles, incliné de 55°, et ayant à-peu-près la largeur de la pinnule oculaire *p*. La petite bande du miroir qui correspond à la fente de cette pinnule est désétamée dans sa partie supérieure seulement, pour que l'observateur puisse, au travers de la glace, viser au fil de la pinnule *p'*.

o, position de l'œil au moment de l'observation. Au moyen des deux pinnules, on vise à un astre, ou à un objet situé dans l'horizon ou élevé à 15 ou 20°. En même temps on voit, par réflexion sur le miroir, en *i*, une portion de la

ligne de foi f, qui est peinte en noir sur le bord intérieur de la boîte ; et en *i'* la division de la rose qui se trouve vis-à-vis la ligne de foi, c'est-à-dire dans le plan vertical du pivot et des fentes des pinnules.

De cette manière on connaît d'un seul coup d'œil l'angle de l'aiguille ou du méridien magnétique, avec le plan vertical de l'astre ou de l'objet. Il reste à déterminer par les moyens connus l'angle de ce dernier plan, avec le méridien astronomique du lieu, pour en déduire la déclinaison. Tout l'instrument est porté sur une traverse *tt'* (*figure* 262) qui se visse sur un pied où elle peut tourner librement ; un cercle fixe *cc'* est porté sur cette traverse ; un cercle intérieur *ee'* repose sur le premier, et tourne sur l'axe *xx'* ; enfin la boîte elle-même est portée par ce cercle mobile, et tourne sur lui au moyen de l'axe *zz'* qui est perpendiculaire à *xx'*. C'est par ces deux mouvemens rectangulaires que la boîte conserve son horizontalité ; ils constituent ce qu'on appelle la *suspension de Cardan*.

La figure 265 représente une *boussole d'arpenteur*, dont on comprendra facilement l'usage d'après ce qui vient d'être dit.

La boussole a été en usage chez les Chinois long-temps avant d'être connue en Europe. On peut conclure de plusieurs documens authentiques, rapportés dans la Description de l'empire de la Chine par Duhalde, que, plus de mille ans avant Jésus-Christ, les Chinois se servaient de la boussole pour se diriger sur les continens. On a supposé que Marco Paolo nous avait apporté cette invention : mais ce voyageur célèbre, qui connut si bien la Chine, ne fut de retour en Europe qu'en 1295 ; et il est parlé de la boussole dès 1180 dans les vers de Guyot de Provins, et dès 1266 dans l'histoire de Norwége. On s'accorde en général à regarder les Melphitains comme les premiers inventeurs de la boussole européenne, et il paraît constant que son usage ne fut un peu répandu que vers l'an 1300.

On croyait, dans les premiers temps, que l'aiguille aimantée se tournait directement au nord dans tous les lieux de la terre; et l'on rapporte que Colomb fut très-étonné d'observer une déclinaison en 1492, lorsqu'il parcourait l'Océan pour aller découvrir le Nouveau-Monde. Il paraît que Cabot, de Venise, qui devint grand-pilote d'Angleterre, fit des observations analogues vers l'an 1500.

Le fait de la déclinaison une fois connu, il fallait découvrir les variations qu'elle éprouve lorsqu'on passe d'un lieu à l'autre. Les premières tables un peu précises qui constatent ce phénomène important furent dressées en 1599 par les navigateurs hollandais, d'après les ordres du prince de Nassau.

Enfin, le changement de la déclinaison dans le même lieu fut découvert en 1622 par Gunter, professeur au collége de Gresham: il trouva à Londres une déclinaison orientale de 6° 13′; tandis qu'elle avait été trouvée de 11° 15′ aussi à l'orient en 1580 par Robert Norman, le même qui découvrit l'inclinaison en 1576.

302. *Boussole d'inclinaison.* — Elle est représentée dans les figures 267 à 271.

La figure 268 représente l'aiguille d'inclinaison *gg′* vue sur sa largeur, et la figure 269 la représente vue sur son épaisseur. Les sections *s*, *s′*, *s″*, donnent une idée de sa forme.

ee′ est une sorte de virole ou d'anneau en cuivre qui s'ajuste, à frottement très-sérré, vers le milieu de la longueur de l'aiguille; il porte un axe en cuivre *cc′*, terminé par de petits cylindres d'acier poli *a* et *a′* qui forment l'axe de rotation. L'axe mathématique *aa* de ces deux cylindres doit passer par le centre de gravité de l'aiguille: on essaie d'atteindre cette condition, ou du moins d'en approcher le plus possible, en plaçant l'anneau convenablement et en faisant mouvoir les vis latérales *vv*.

L'aiguille est en place dans la figure 267; le rectangle sur

lequel elle repose est une pièce importante de la boussole. On le voit plus en grand et avec plus de détails dans l'élévation (*fig.* 270) et dans la coupe (*fig.* 271). Il se compose d'une traverse fixe *tt'* qui porte le couteau d'agate *pp'*, et d'une autre traverse *mm'* mobile autour de l'axe *a*. Celle-ci porte une fourchette *f* qui soulève l'axe de l'aiguille quand on ne veut plus qu'elle repose sur les couteaux d'agate, et d'une pièce d'arrêt *r* qui empêche l'axe de se glisser sur la fourchette. Cet ajustement est combiné pour que l'axe de l'aiguille se trouve exactement au centre du limbe d'inclinaison *ll'* (*fig.* 267), et perpendiculaire à son plan dès qu'on abaisse la fourchette pour commencer l'observation.

Le limbe *ll'* repose perpendiculairement sur une plaque solide *pp'* qui porte aussi les montans du rectangle, une cage en verre *rr'* et un niveau *nn'*. Tout ce système est mobile autour d'un axe vertical *xx'*, qui passe par le centre du cercle *ll'* et par conséquent par le centre de gravité de l'aiguille. Un nonius *ii'*, attaché à la plaque *pp'*, parcourt le cercle azimuthal *zz'* pour marquer à chaque instant sur ce plan les angles décrits par le limbe vertical.

Pour observer l'inclinaison avec cet instrument, quand on connaît déjà la déclinaison ou la direction du méridien magnétique, on met le limbe vertical dans cette direction, et l'aiguille vient d'elle-même se placer suivant la ligne d'inclinaison : si l'on ne veut pas attendre qu'elle soit en repos, on prend le milieu des petites oscillations qu'elle fait avant de s'arrêter. Après ce premier résultat, on retourne les faces de l'aiguille sans en retourner les pôles, afin de corriger par ce retournement les erreurs qui pourraient provenir soit de l'irrégularité de l'aimantation, soit de l'excentricité du centre de gravité ; mais ces deux causes d'erreur n'étant par là qu'imparfaitement compensées, il est nécessaire de faire deux autres observations pareilles, après avoir renversé les pôles de l'aiguille en l'aimantant dans le sens contraire. C'est la moyenne de ces quatre résultats qui donne l'inclinaison.

On peut facilement se dispenser de déterminer d'avance la déclinaison. En effet, le couple terrestre étant contenu dans le plan du méridien magnétique, l'aiguille n'est jamais sollicitée à sortir de ce plan, et par conséquent elle doit se diriger verticalement quand on l'oblige à se mouvoir dans un plan vertical perpendiculaire à ce méridien. Réciproquement, si l'on tourne le limbe de la boussole jusqu'à ce que l'aiguille soit verticale, on peut être assuré qu'il est alors perpendiculaire à l'aiguille de déclinaison, et il suffit de lui faire décrire, à partir de là, 90° sur le cercle azimuthal pour l'amener dans le méridien magnétique. On pourrait encore, pour plus de simplicité, chercher par quelques tâtonnemens l'azimuth du limbe qui donne le minimum d'inclinaison : ce minimum est l'inclinaison du lieu, puisque de part et d'autre l'aiguille se rapproche de la verticale.

Le tableau suivant contient diverses inclinaisons observées à Paris. Celles qui précèdent 1798 peuvent offrir des erreurs assez considérables, parce qu'alors on ne prenait pas la moyenne de 4 observations, comme nous l'avons indiqué.

Tableau de l'inclinaison pour Paris.

années.	inclinaisons.		années.	inclinaisons.	
1671	75°		1819	68°	25'
1754	72	15'	1820	68	20
1776	72	25	1821	68	14
1780	71	48	1822	68	11
1791	70	52	1823	68	8
1798	69	51	1825	68	0
1806	69	12	1826	68	0
1810	68	50	1829	67	41
1814	68	36	1831	67	40
1816	68	40	1835	67	24
1818	68	35			

Sauf quelques irrégularités, il résulte de ce tableau que l'inclinaison, à Paris, a toujours été en diminuant depuis 1671, et que la diminution a été sensiblement variable d'une année à l'autre.

La découverte de l'inclinaison remonte de l'année 1576 ;

elle est due à Robert Norman, ingénieur en instrumens dans l'un des faubourgs de Londres : jusque-là on avait supposé que l'aiguille devait être horizontale, et, lorsqu'en Europe on voyait son pôle austral s'abaisser, on se contentait d'admettre que le centre de gravité était mal déterminé. Robert Norman, observateur plus ingénieux et plus précis qu'on ne l'était alors, mesura le contre-poids qu'il fallait ajouter, et fut conduit ainsi à l'une des plus importantes découvertes du magnétisme.

169. *Boussole des variations diurnes.* — L'aiguille de déclinaison éprouve tous les jours quelques mouvemens à l'est ou à l'ouest du méridien magnétique : tantôt ces mouvemens sont brusques et accidentels, tantôt ils sont réguliers et périodiques : dans le premier cas, on les nomme *perturbations ;* dans le second cas, ils se composent de ce qu'on appelle les *variations diurnes*. Dans les jours qui ne sont pas marqués par quelques perturbations, l'on observe à Paris les phénomènes suivans : pendant la nuit, l'aiguille est à-peu-près stationnaire ; au lever du soleil, elle se met en mouvement, et son pôle austral (ou son extrémité nord) marche à l'ouest comme s'il fuyait l'influence de cet astre ; vers midi, ou plus généralement de midi à trois heures, il atteint son *maximum* de déviation occidentale ; ensuite, par un mouvement contraire, il revient à l'orient jusqu'à 9, 10 ou 11 heures du soir : alors, soit que l'aiguille ait repris exactement sa position primitive, soit qu'elle s'en trouve seulement très-rapprochée, elle s'arrête et reste immobile pendant toute la durée de la nuit, pour recommencer le lendemain une oscillation pareille.

L'*amplitude* de la variation diurne est l'angle que parcourt l'aiguille depuis la station du matin jusqu'au maximum de déviation occidentale. Cet angle est toujours variable : cependant, il résulte des nombreuses observations de M. de Cassini, qu'en général il est plus grand pendant l'été, depuis l'équinoxe du printemps à l'équinoxe d'automne ; et

plus petit pendant l'hiver, depuis l'équinoxe d'automne à l'équinoxe de printemps. Sa valeur moyenne pour les mois d'avril, mai, juin, juillet, août et septembre, paraît être de 13′ à 15′; et seulement de 8′ à 10′ pour les mois d'octobre, novembre, décembre, janvier, février et mars. Il y a des jours où il s'élève jusqu'à 25′, et d'autres où il ne dépasse pas 5 ou 6′.

On doit encore à M. de Cassini cette remarque importante, que, dans les caves de l'Observatoire, l'aiguille de déclinaison éprouve aussi des changemens journaliers; là, à plus de 80 pieds sous terre, à l'abri de toutes les influences de la lumière et de la chaleur du jour, l'amplitude de ses variations est la même qu'à la surface du sol, et c'est aux mêmes heures qu'elle est immobile, qu'elle marche à l'occident et qu'elle revient à l'orient.

Dans les régions les plus septentrionales, comme en Danemarck, en Islande et au nord de l'Amérique, les variations diurnes sont en général plus considérables et moins régulières; il paraît aussi que l'aiguille ne conserve pas pendant la nuit l'immobilité qu'on observe à Paris, et que c'est vers le soir seulement qu'elle atteint son maximum de déviation occidentale.

Au contraire, en partant du nord pour aller vers l'équateur magnétique, les variations diurnes vont sans cesse en diminuant d'amplitude, et sur l'équateur magnétique lui-même elles sont sensiblement nulles. Il paraît cependant, d'après quelques observations du capitaine Duperrey, que la position du soleil au nord ou au midi de l'équateur terrestre pourrait avoir quelque influence pour faire osciller, de part et d'autre de l'équateur magnétique, les points qui sont sans variations.

Au midi de l'équateur magnétique, les variations diurnes se produisent dans un ordre inverse: l'extrémité nord de l'aiguille marche vers l'est, aux mêmes heures où, dans l'hémisphère boréal, elle marche à l'ouest; ce résultat cu-

rieux est constaté par les observations qui ont été faites, en 1794, 1795 et 1796, au fort Malbrough de Sumatra et à Sainte-Hélène, par M. J. Macdonald; en 1818, 1819 et 1820, à l'île de France, à Timor, à Rawak, à Guham, à Movi et au port Jackson, par le capitaine Freycinet; et en 1822, 1823 et 1824, dans plusieurs points qui avoisinent l'équateur magnétique, par le capitaine Duperrey.

On ne sait pas encore d'une manière précise si, dans chaque hémisphère, les variations diurnes se font dans le même sens et aux lieux où la déclinaison est occidentale, et aux lieux où elle est orientale. Il y a sur ce point quelque discordance entre les observations trop peu nombreuses que nous possédons, et c'est un phénomène sur lequel il importe d'appeler l'attention des Physiciens.

L'aiguille d'inclinaison est soumise à des variations diurnes, comme celle de déclinaison, mais elle a moins d'amplitude dans ses mouvemens.

En généralisant ces résultats, on peut présumer qu'une aiguille aimantée, mobile dans un plan quelconque, éprouverait des oscillations journalières, et qu'une aiguille qui serait mobile dans tous les sens, autour de son centre de gravité, décrirait chaque jour un cône dont la base serait une ellipse ou une autre courbe plus ou moins allongée dans les différens lieux de la terre.

Les variations diurnes furent observées pour la première fois par Graham, à la fin de 1722; ensuite elles furent étudiées avec soin, en Suède, par Hiorter et Celsius vers 1740, et par Wargentin en 1750; à Londres, par Canton, en 1756; en Danemark, par Lous, de 1765 à 1772; à Rome, par le père Ascleppi, en 1772; en France, par M. de Cassini, de 1780 à 1790. Depuis cette époque, les instrumens sont devenus plus parfaits, les observations se continuent sur plusieurs points du globe, et les voyageurs, dans leurs courses autour du monde, doivent les compter comme un des objets les plus importans de leurs recherches.

La figure 266 représente la *boussole de variation*. Tous les observateurs ne peuvent pas sans doute se procurer un instrument aussi complet, mais tous peuvent disposer des aiguilles d'après les principes de sa construction, et arriver ainsi à une assez grande exactitude dans les observations. Il est presque inutile de faire remarquer que toutes les pièces de métal sont en cuivre rouge très-pur.

zz', table de marbre blanc, sur laquelle reposent les colonnes et la boîte de l'instrument.

ss', colonne pour la suspension.

mm, colonnes pour le premier microscope.

m'm', colonnes pour le second microscope.

bb', boîte de la boussole.

aa', aiguille aimantée, passée de champ dans un petit anneau de cuivre *n*; à cet anneau est attaché un fil, ou plutôt un assemblage de fils de soie sans torsion, qui porte l'aiguille et qui vient s'enrouler sur le petit treuil *t*. Ce fil est maintenu au centre du cercle divisé *cc*, en traversant, là, une petite cage de verre qui s'élève entre les deux colonnes *ss* pour que l'air ne puisse ni l'agiter ni pénétrer dans la boîte; en tournant le treuil *t* dans un sens ou dans l'autre, on peut élever ou abaisser l'aiguille. Deux lames de verre, mobiles à volonté, ferment les ouvertures de la boîte, qui correspondent aux deux extrémités de l'aiguille; sur chacune de ces extrémités, est solidement fixée une petite plaque d'ivoire, portant des divisions très-fines dont la valeur angulaire dépend de la distance au centre de suspension; c'est en général de 15 ou 20'.

Après avoir disposé l'appareil à-peu-près dans le plan du méridien magnétique et l'avoir nivelé soigneusement, on s'assure que le fil de soie est sans torsion, et, par quelques tâtonnemens, on arrive à diriger les microscopes *r* et *r'* sur la ligne de foi de l'aiguille, dont on voit la trace sur les deux plaques d'ivoire. Alors, il est facile d'observer les déplacemens qu'elle éprouve, soit en comptant les divisions qui ont

passé sous le fil, soit en suivant ses mouvemens, au moyen des vis-de-rappel qui font marcher les microscopes. De petites loupes p et p', mobiles sur les tiges i et i', servent à lire la position ou la course de chaque microscope sur la traverse qui le porte et qui règle son mouvement latéral.

La lunette l est destinée à compter plus commodément, et par conséquent plus sûrement les oscillations de l'aiguille, lorsqu'on veut l'employer à la détermination des intensités magnétiques. Elle porte au devant de l'objectif un prisme rectangulaire ou un miroir qui ramène les rayons verticaux dans la direction de son axe.

170. *Perturbations de l'aiguille aimantée.* — Plusieurs causes naturelles agissent sur l'aiguille aimantée, ou pour la déranger brusquement de sa position, ou pour troubler au moins la régularité de ses variations diurnes. Entre toutes ces causes, l'aurore boréale paraît la plus efficace et la plus infaillible : quand ce météore se lève pour les régions du nord, le ciel est resplendissant de lumière, et, pendant toute sa durée, qui est quelquefois de dix à douze heures, l'aiguille aimantée éprouve une agitation continuelle et une déviation considérable. Le *sommet* de l'arc étincelant de l'aurore boréale est en général dans le méridien magnétique, et sa *couronne*, c'est-à-dire le foyer vers lequel s'élancent les gerbes de feu qui semblent partir de l'horizon ou de l'arc lui-même, se trouve toujours à-peu-près dans le prolongement de l'aiguille d'inclinaison. Ce n'est pas seulement dans les lieux où l'aurore boréale est visible que la boussole est agitée ; elle l'est aussi à de grandes distances, à Paris, par exemple, lors même qu'on n'aperçoit dans le ciel aucune trace de lumière. Mais, en général, l'agitation est d'autant plus grande que le phénomène est plus voisin et se montre avec plus d'intensité : ainsi, la boussole de l'Observatoire éprouve souvent, dans le jour ou dans la nuit, une déviation subite qui s'élève parfois à plus de 1° sans qu'on en puisse découvrir la cause apparente ; et l'on apprend ensuite qu'aux mêmes instans les

boussoles de Londres et de Pétersbourg ont éprouvé des mouvemens analogues, et que dans les contrées du nord on a observé quelque brillante aurore boréale. Un observateur, dans son cabinet, est donc averti par la boussole de ce qui se passe dans les régions polaires, comme il est averti par le baromètre de ce qui se passe dans les plus hautes régions de l'atmosphère.

Les tremblemens de terre et les éruptions de volcans paraissent agir aussi sur l'aiguille aimantée, et quelquefois ces phénomènes la dérangent d'une manière permanente. D. Bernouilli a vu, en 1767, l'inclinaison diminuer d'un demi-degré par un tremblement de terre, et le père de La Torre a remarqué des changemens de plusieurs degrés dans la déclinaison pendant une éruption du Vésuve.

Enfin, l'on a supposé que les ouragans, la neige et les orages ont aussi quelque influence sur l'aiguille aimantée; mais il faut probablement rapporter aux aurores boréales les changemens sur lesquels on a fondé cette opinion. Cependant, quand le tonnerre frappe des corps aimantés, ou quand il tombe seulement à quelque distance du lieu où ils sont, il change, détruit, ou renverse leur magnétisme; on en a vu de trop malheureux exemples à bord des vaisseaux : plusieurs fois les boussoles de service ont eu leurs pôles renversés par la foudre, et les navigateurs prenant alors le nord pour le sud, couraient avec confiance se jeter dans les écueils.

La découverte de l'électro-magnétisme nous expliquera ces phénomènes.

171. *Intensité magnétique de la terre.* — Un des points les plus importans de la théorie du magnétisme terrestre est la détermination de son intensité pour les différens points de la surface du globe, ou pour le même point, à des époques différentes. C'est dans ces derniers temps seulement qu'on a eu l'heureuse idée d'appliquer à cette recherche des moyens susceptibles de quelque précision. Graham paraît être le premier qui se soit occupé de cette question, vers la

fin de 1722 ; Muschenbroek fit quelques efforts pour la résoudre en 1729 ; Lemonnier, en 1776, se contenta d'en montrer l'importance ; de Saussure voulut comparer la force magnétique de la terre, à Genève et au sommet du Mont-Blanc ; enfin Borda, reprenant la question dans toute sa généralité, indiqua les moyens de la résoudre avec une grande approximation ; et bientôt après, sa méthode fut employée par M. de Humboldt, dans son voyage d'Amérique, et dans un autre voyage en France, en Prusse et en Italie.

Cette méthode est fondée sur les oscillations nombreuses que fait une aiguille librement suspendue, lorsqu'on l'écarte un peu de sa position, et qu'ensuite on l'abandonne à elle-même. Si elle est régulièrement aimantée, et que l'axe de suspension passe par son centre de gravité, elle oscille par l'effort du couple magnétique de la terre, comme oscillerait séparément chacune de ses moitiés, sollicitée par l'une des forces du couple. Ainsi, elle forme un véritable pendule composé, qui reste parfaitement identique, quand la distribution du magnétisme reste exactement la même dans tous les points de sa substance ; car, si le fluide libre éprouvait quelque changement, soit dans sa quantité, soit dans son arrangement, la résultante aurait une autre intensité ou un autre point d'application, et la même aiguille formerait en réalité un pendule différent. Supposant donc que l'aiguille reste matériellement et magnétiquement la même, une différence dans la durée de ses oscillations ne pourra dépendre que d'une différence dans l'intensité des forces qui la sollicitent, et, la pesanteur restant la même, elle ne pourra dépendre que d'une différence dans l'intensité de la force magnétique.

Or, sous ses conditions, les intensités de la force et les durées des oscillations sont liées par le principe suivant : que les forces sont entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations exécutées dans le même temps.

Ainsi, m étant la force magnétique qui agit sur l'aiguille quand elle fait n oscillations dans un certain temps, dans 100″

par exemple, et m' étant la force qui la sollicite quand elle fait n' oscillations dans le même temps de 100″, l'on a

$$\frac{m}{m'} = \frac{n^2}{n'^2}.$$

Si, par exemple, on avait trouvé $n = 25$ et $n' = 24$, on aurait

$$\frac{m}{m'} = \frac{625}{576} = 1{,}085,$$

c'est-à-dire que la première force serait à la seconde comme 1,085 est à 1, ou comme 1085 est à 1000.

Pour appliquer cette méthode, on peut faire osciller une aiguille, soit dans le plan du méridien magnétique autour de la ligne d'inclinaison, soit perpendiculairement au méridien magnétique autour de la ligne de déclinaison; on pourrait même la faire osciller dans d'autres positions, mais l'on n'y trouverait nul avantage.

Oscillations de l'aiguille d'inclinaison. — Puisque le plan du méridien magnétique varie à chaque instant, il faut apporter un grand soin à placer la boussole dans sa vraie direction du moment; et, puisqu'on doit compter un grand nombre d'oscillations de l'aiguille, il faut aussi apporter un grand soin à donner à l'axe toute la mobilité qu'il peut prendre sur ses deux couteaux d'agate. Ces conditions remplies, on écarte l'aiguille de 3 ou 4° de sa position d'équilibre, on l'abandonne à elle-même, et, avec un chronomètre ou une bonne montre à secondes, on compte très soigneusement le nombre des oscillations qu'elle exécute dans un temps donné. Après quelques séries d'observations successives, dont on prend la moyenne, on enlève l'aiguille, on la conserve dans un étui avec beaucoup de précautions pour qu'elle ne reçoive aucun choc ou aucune influence magnétique étrangère, et ensuite on peut l'emporter en voyage, pour répéter des expériences pareilles en différens points du globe.

Mais, pour que les résultats puissent inspirer de la confiance, il est nécessaire d'avoir plusieurs aiguilles de cette es-

pèce qui se vérifient l'une l'autre, et même il est convenable de revenir au même lieu, les faire osciller encore une fois, pour s'assurer qu'elles ont bien conservé leur magnétisme. Dans la recherche de l'inclinaison, la méthode du retournement (168) peut corriger les erreurs qui proviendraient d'une aimantation irrégulière, ou d'un déplacement du centre de gravité : mais, pour les recherches d'intensité, l'aiguille devant rester absolument identique, il faut se garder de l'aimanter en sens contraire, et par conséquent il faut, par tous les moyens de vérification, s'assurer que son magnétisme est régulier et son centre de gravité bien placé.

Oscillations de l'aiguille de déclinaison. — La force qui fait osciller l'aiguille de déclinaison n'est qu'une partie de la force magnétique de la terre, et une partie d'autant plus petite que l'inclinaison est plus grande, tellement qu'aux pôles magnétiques, où l'inclinaison est de 90°, l'aiguille de déclinaison n'a plus de force, ni pour se diriger ni pour osciller. En général, i étant l'angle d'inclinaison d'un lieu (*fig.* 242), la force terrestre, dont l'intensité est m, se décompose en deux autres par la règle du parallélogramme des forces (18) : l'une, verticale, ayant pour valeur $m \sin i$, et qui est détruite par la suspension ; et l'autre, horizontale, ayant pour valeur $m \cos i$, qui est seule efficace pour diriger et pour faire osciller l'aiguille de déclinaison. Pour un autre lieu, où l'intensité serait m' et l'inclinaison i', la force horizontale serait $m' \cos i'$, et les deux forces seraient entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations n et n', qu'elles font exécuter à la même aiguille dans le même temps. On aurait donc

$$\frac{m \cos i}{m' \cos i'} = \frac{n^2}{n'^2} \text{ ou } \frac{m}{m'} = \frac{n^2 \cos i'}{n'^2 \cos i} \quad ;$$

c'est-à-dire qu'ayant observé dans des lieux différens les nombres d'oscillations n et n' que fait la même aiguille, dans le même temps, il faut, pour avoir le rapport des forces

magnétiques, multiplier le rapport carré des nombres d'oscillations par le rapport renversé des cosinus d'inclinaison.

Cette méthode d'observation semble avoir quelque avantage sur la précédente : 1° parce qu'il faut un artiste très-habile pour faire une aiguille d'inclinaison tolérablement bonne et bien équilibrée, tandis qu'une aiguille de déclinaison s'équilibre d'elle-même dans la chape de papier où elle est suspendue ; 2° parce que les couteaux d'agate et l'axe de l'aiguille d'inclinaison offrent beaucoup plus de frottement que le fil de soie sans torsion qui suspend l'aiguille de déclinaison. Cependant, il y a dans les oscillations horizontales une source d'erreur inévitable : l'un des pôles de l'aiguille ayant une tendance à plonger au-dessous de l'horizon, il en résulte que le prolongement du fil de suspension ne passe jamais par le centre de gravité ; de là une différence dans les deux bras de levier de l'aiguille horizontale, et une différence qui change avec l'inclinaison. Il est d'autant plus nécessaire de signaler cette cause d'erreur qu'elle a échappé aux plus habiles observateurs, bien qu'elle soit assez influente pour rendre tout-à-fait incomparable les observations faites en des lieux où l'inclinaison est très-différente.

On voit (*fig.* 277 et 276) la boussole d'intensité de M. Gambey : la caisse ronde est en bois ; elle se couvre d'un verre, et en outre elle est percée de deux fenêtres rondes opposées, pour viser à l'index *i* de l'aiguille au moyen de la lunette *l*.

En discutant les observations d'intensité qui ont été faites en différens points de la terre, soit en Europe, soit en Amérique, soit dans les îles de l'Océan, de la mer des Indes ou de la mer Pacifique, on arrive à ce résultat général que l'intensité est la plus petite vers l'équateur magnétique, et qu'elle va en augmentant à mesure qu'on s'en éloigne vers le nord ou vers le sud. Il paraît que vers les pôles elle serait environ une fois et demie aussi grande qu'à l'équateur. Dans le même lieu elle paraît changer aussi avec les variations diurnes, mais les différences très-petites qu'elle éprouve de-

mandent à être constatées par de nouvelles observations.

172. *De l'action de la terre sur le fer doux.* — La terre exerce une action continuelle sur toutes les substances qui contiennent du magnétisme ; elle agit comme un vaste aimant qui fait sans cesse effort pour attirer ou repousser les fluides décomposés, et pour décomposer les fluides naturels. Les différens corps magnétiques répandus sur la surface du globe résistent plus ou moins à cette puissance universelle, suivant l'intensité de leur force coercitive, mais tous en éprouvent quelque modification. Le fer doux est, sous ce point de vue, le corps le plus curieux à étudier, puisqu'il n'offre aucune résistance à la séparation de ses fluides et qu'il ne conserve rien des actions magnétiques qu'il a subies. Les expériences suivantes nous donneront une idée des phénomènes qu'il présente.

Une barre de fer doux de deux ou trois pieds de longueur est mise en présence d'une petite aiguille d'épreuve (*fig.* 239).

Quand la barre est tenue verticalement, ou à-peu-près dans la direction de l'inclinaison, elle prend un pôle austral à son extrémité inférieure *e*, et un pôle boréal à son extrémité supérieure *e'*. C'est ce qu'il est facile de voir par les actions attractives et répulsives qu'elle exerce sur l'un ou l'autre pôle de l'aiguille lorsqu'on la fait glisser, de haut en bas ou de bas en haut, pour amener successivement en présence toutes les parties de sa longueur.

Pour s'assurer que le fer est sans force coercitive, et que c'est bien l'action terrestre qui décompose son magnétisme, il suffit de retourner rapidement la barre, l'extrémité *e* en haut, et l'extrémité *e'* en bas; alors le pôle austral reste en bas, et le pôle boréal en haut : le second est cette fois en *e*, et le premier en *e'*. Ainsi, les fluides ont été instantanément recomposés par leur action mutuelle, et instantanément décomposés en sens inverse par l'action terrestre.

Ce qui se manifeste d'une manière si frappante sur une barre d'une certaine longueur se manifeste avec moins d'in-

tensité sur une pièce plus courte dans le sens de l'inclinaison; c'est pourquoi l'effet semble à-peu-près nul lorsqu'on tient la barre horizontalement, et surtout dans une position perpendiculaire au méridien magnétique.

Sous l'influence de l'aimant terrestre, tous les corps magnétiques deviennent donc de véritables aimans, mais des aimans à pôles mobiles et changeans, de telle sorte qu'il suffit de les retourner de haut en bas pour que leurs pôles se renversent, et de varier un peu leur position pour que leurs pôles éprouvent quelques déplacemens dans l'intérieur de leur substance. Ce résultat nous indique combien il y a de précautions à prendre lorsqu'on veut faire avec les boussoles des observations exactes; car le fer, qui entre dans la construction des édifices, agit de deux manières sur les aiguilles aimantées : il agit par la décomposition magnétique qu'il éprouve de la part de l'aiguille elle-même, et il agit surtout par les fluides libres que la terre y maintient dans un état permanent de séparation. Avec quelques soins, l'on peut aisément reconnaître les perturbations locales qui résulteraient de cette cause, car dans un espace un peu considérable, dans une lieue carrée par exemple, l'action terrestre ne produit en général que quelques minutes de différence, soit dans l'inclinaison soit dans la déclinaison.

173. *Des causes mécaniques et chimiques qui ont une influence sur la force coercitive.* — Lorsqu'une barre de fer doux est soumise à l'action magnétique de la terre, il suffit de la frapper de quelques coups de marteau à l'une ou l'autre de ses extrémités, pour fixer au moins en partie les fluides décomposés par lesquels elle agit sur l'aiguille. Après la percussion, elle est un aimant à pôles fixes, et, de quelque côté qu'on la retourne, le même fluide se montre toujours à la même extrémité. Ainsi, la percussion donne au fer doux de la force coercitive; cette force est sans doute locale et n'existe que dans les molécules qui ont reçu le choc, car, en retournant la barre, et en la frappant dans cette po-

sition inverse de la précédente, on parvient à l'aimanter en sens contraire. On peut ainsi renverser ses pôles autant de fois que l'on veut, et, ce qui est encore digne de remarque, c'est qu'après quelques jours, ou quelquefois même après quelques heures, la force coercitive a disparu, et il faut de nouveaux chocs pour la reproduire.

Cette expérience curieuse donne la clef d'un grand nombre de phénomènes, sur lesquels j'insisterai d'autant plus volontiers que personne à ma connaissance n'en a donné la véritable explication. Tout le monde sait que les substances magnétiques sont presque toujours dans un état d'aimantation plus ou moins marqué. C'est un certain Jules César, chirurgien de Rimini, qui observa le premier la transformation du fer en aimant; il fit cette remarque, vers 1590, sur une barre de fer qui avait soutenu quelque construction en brique sur le sommet d'une tour de l'église de Saint-Augustin. Plus tard, vers 1630, Gassendi fit la même observation sur la croix du clocher de Saint-Jean d'Aix, qui était tombée frappée de la foudre; il en trouva le pied consumé par la rouille et jouissant de toutes les propriétés de l'aimant. Depuis cette époque, les observations se sont multipliées, et l'on a reconnu qu'un morceau de fer un peu rouillé est presque toujours un aimant plus ou moins fort; qu'il en est de même de la fonte, de l'acier et des autres substances magnétiques; enfin, l'on a reconnu que la rouille, ou l'oxidation, n'est pas du tout nécessaire pour qu'un corps s'aimante, et qu'il suffit pour cela de lui faire subir quelque action mécanique, de le tordre, de le battre, de le limer ou de le tourmenter de quelque manière : par exemple, dans la boutique d'un serrurier tous les outils sont des aimans, et il n'est pas rare que les aiguilles, les instrumens tranchans et les autres objets d'acier présentent des traces de magnétisme polaire. Dans tous ces phénomènes, ce n'est ni l'action chimique ni l'action mécanique qui magnétisent les corps : mais c'est l'action de la terre, sans cesse agissante, qui décompose les fluides,

et, la décomposition une fois faite, elle est maintenue par la force coercitive, qui résulte des déplacemens chimiques ou mécaniques qu'éprouvent les molécules. Pour m'en assurer par l'expérience, il m'a suffi de comparer les quantités de magnétisme que prennent les corps, suivant la position qu'on leur donne, par rapport à la direction de la force terrestre. Dans une position verticale, il s'aimante fortement par l'oxidation ou par les actions mécaniques, et le pôle austral est toujours en bas. Dans des positions plus obliques, l'effet est moindre, mais toujours dans le sens voulu par le pôle boréal de la terre, qui est le pôle dominant dans nos climats. On peut même, d'après cette donnée, fabriquer de toutes pièces des aimans très-puissans, soit avec du fil de fer, soit avec des barres de fer ou d'acier. Pour aimanter des fils de fer sans aimant, il suffit d'en couper trente ou quarante bouts, de la longueur d'un pied par exemple, et, en les tenant verticalement, de les tordre sur eux-mêmes, un à un, jusqu'à les rendre raides et cassans : chacun d'eux devient fortement magnétique, et on les réunit ensuite pour en former des faisceaux, avec lesquels on aimante les plus gros barreaux par des procédés que nous ferons connaître. Pour aimanter sans aimant des barres de fer ou d'acier, il suffit de battre les premières en les tenant verticalement; et pour les secondes, il suffit de les frotter dans le même sens avec une barre de fer verticale.

Les aimans naturels n'étant que des oxides de fer, il est probable qu'ils doivent leurs propriétés magnétiques à l'action de la terre qui s'est exercée sur eux au moment de leur formation. Car les mines de fer qui existent de nos jours ne sont pas aussi anciennes que le monde, et, sans admettre qu'à l'origine le fer fût dans son état pur et métallique, il est certain que les combinaisons dans lesquelles il est engagé à la surface du globe et dans toute l'étendue de la croûte que nous exploitons, ne furent pas toujours ce qu'elles sont aujourd'hui. Le travail chimique qui s'accomplit sans cesse,

et qui sans cesse se renouvelle depuis tant de siècles dans les entrailles de la terre, fait passer les molécules les plus inertes par une foule de combinaisons différentes et change de mille manières leurs agrégations primitives. Les mines magnétiques sont soumises à des mutations perpétuelles comme les autres élémens pondérables, et l'on peut dire avec certitude qu'à chaque instant il y en a qui se décomposent, qu'à chaque instant il y en a d'autres qui se forment et dont les pôles sont arrangés suivant les lois voulues par le magnétisme général de la terre.

Telle est sans doute la cause première qui a développé du magnétisme dans les aimans naturels, soit dans ceux que possèdent les Chinois depuis plus de trois mille ans, soit dans ceux qui furent observés par Pythagore et Platon, soit dans ceux que nous exploitons aujourd'hui et qui servent à nos recherches.

Il n'y a donc, à notre connaissance, que du magnétisme développé qui puisse développer le magnétisme.

Cette conclusion a été rigoureuse jusqu'à la découverte de M. OErsted, qui a ouvert un nouveau champ dans les sciences en démontrant, comme nous le verrons dans l'une des sections suivantes, que l'électricité aussi peut développer du magnétisme.

174. *De l'action de la terre sur le fer des vaisseaux, et des moyens de corriger la déviation que la boussole en éprouve.* — De grandes masses de fer sont employées dans nos vaisseaux : les unes font partie de la construction et restent fixes ; les autres font partie de l'armement et sont plus ou moins mobiles, comme les canons de fer ou de fonte, les ancres, les câbles, les barriques et les outils de toute espèce. Tous ces corps magnétiques, dispersés çà et là dans les différentes parties du bâtiment, doivent exercer sur la boussole et exercent en effet une action considérable. Les déviations produites par cette cause méritent toute l'attention des Physiciens ; elles s'élèvent quelquefois à 15 ou 20 de-

grés, et fussent-elles quinze ou vingt fois moindres, elles seraient encore plus que suffisantes pour exposer les navigateurs à de très-grands dangers.

Il paraît que c'est Wales, astronome de l'expédition de Cook, qui a, le premier, signalé cette source d'erreurs dans les observations à la mer; plus tard, leur véritable cause fut indiquée par Downie, et c'est le capitaine Flinders, célèbre par ses découvertes et par son intrépidité, qui fit le premier quelques essais heureux pour s'en mettre à l'abri. Il y a quelques années, M. Bain a rappelé l'attention sur ce point important; plusieurs officiers de la marine anglaise en ont fait l'objet de leurs recherches, et le professeur Barlow de Woolwich a été couronné par la Société Royale de Londres pour les heureux résultats auxquels il a été conduit en s'occupant de cette question. C'est l'ouvrage de M. Barlow qui nous servira de guide dans ce que nous allons dire.

Dans un vaisseau, l'aiguille de la boussole peut être déviée : 1° Par les décompositions de fluide qu'elle excite elle-même dans les substances magnétiques; 2° par l'état magnétique permanent que ces substances peuvent avoir en vertu de leur force coercitive; 3° par l'état magnétique passager qu'elles prennent sous l'influence de l'aimant terrestre.

La première cause ne peut produire que de faibles effets; et l'on s'en garantit sûrement en plaçant l'*habitacle* à une distance assez grande de toutes les pièces de fer, ce qui est toujours possible.

La seconde cause aurait un remède facile; car l'aiguille aimantée se trouvant placée, à l'égard des divers pôles ou centres magnétiques du vaisseau, à une distance très-grande par rapport à sa longueur, il en résulte que chacun de ces centres agit sur elle par un couple. Par la composition de tous ces couples partiels, on aurait donc un couple résultant qui resterait toujours le même dans tous les climats et pour toutes les positions du vaisseau. Ce couple, à son tour, se composerait avec le couple terrestre, et c'est là ce qui pro-

duirait la déviation de l'aiguille. Mais dans le même lieu, quand le vaisseau tournerait sur lui-même autour d'un axe vertical, le couple terrestre conservant la même direction dans l'espace, et le couple du vaisseau tournant avec lui, on voit qu'il en résulterait une déviation variable, susceptible d'un maximum à droite du méridien magnétique, et d'un autre maximum égal à sa gauche; de telle sorte que la moyenne entre ces deux positions extrêmes de l'aiguille donnerait sa vraie direction. Pour d'autres latitudes, le couple terrestre serait plus intense ou plus oblique; mais la déclinaison se trouverait encore de la même manière, par la rotation complète du vaisseau autour d'un axe vertical.

Enfin, la troisième cause est plus puissante que les deux premières, et ses effets, sans cesse variables, sont aussi plus difficiles à apprécier et à corriger. Nous allons pour un moment supposer qu'elle agisse seule pour dévier l'aiguille aimantée. Alors, il est clair que tous les corps magnétiques du vaisseau deviennent des aimans à pôles changeans; quand le vaisseau tourne sur lui-même dans un sens ou dans l'autre, ces corps se présentent autrement à l'action de la terre, et éprouvent de sa part des décompositions différentes. Ces phénomènes, déjà si compliqués dans le même lieu, se compliquent encore, quand le vaisseau, sillonnant les mers, passe successivement dans des contrées où le couple terrestre change de direction ou d'intensité. Tous ces effets divers ne peuvent être ni prédits ni même indiqués par la théorie, et ce n'est que par des essais plus ou moins ingénieux que l'on peut les neutraliser. Voici les moyens que propose M. Barlow pour y parvenir.

Le bâtiment étant dans une rade tranquille où l'on peut le virer de bord, on choisit à quelque distance sur le rivage un lieu d'où l'on puisse l'apercevoir dans toutes les positions qu'il prend en tournant sur lui-même. Là s'établit un observateur avec une boussole et un théodolite, ou quelque autre instrument propre à mesurer les angles. Sur le vaisseau, près

de la boussole déjà fixée dans l'habitacle, est un autre observateur, ayant aussi un instrument pareil. A un signal donné les observateurs visent l'un à l'autre, et chacun d'eux détermine l'angle de son aiguille avec l'axe de sa lunette. Puisque les observateurs se regardent, les axes des deux lunettes ne font qu'une seule et même ligne, que nous appellerons *la ligne centrale.*

Or, la boussole du rivage n'éprouvant point de perturbation, il est évident que, si la boussole du vaisseau n'en éprouvait pas, les deux aiguilles seraient parallèles et feraient le même angle avec la ligne centrale, car la distance de quelques centaines de pieds qui se trouve entre elles ne peut pas produire de changement sensible dans la déclinaison. Donc, la différence de ces deux angles est la déviation produite par les corps magnétiques du vaisseau à l'instant de l'observation. Concevons que, par des manœuvres qui sont toujours faciles pendant le calme, on fasse faire au vaisseau une révolution complète, et qu'à chaque rumb de vent qu'il parcourt, ou à chaque angle de 10 ou 12 degrés dont il tourne, on fasse une observation pareille à la précédente; alors, on aura, pour chacune de ces positions, la valeur de la déviation locale produite par les corps magnétiques dont il est chargé. On pourrait ensuite, s'il était nécessaire, trouver, par des interpolations, les déviations correspondantes à chaque degré.

Cette première opération terminée, l'observateur du rivage enlève sa boussole, et à sa place il substitue celle du vaisseau, en la posant, au même point, sur une espèce de cage en bois, qui peut faire une révolution complète autour de la verticale du pivot de l'aiguille. Cette cage est représentée dans la figure 276. Sur l'un de ses côtés on voit, de distance en distance, des trous qui sont destinés à recevoir le *compensateur magnétique ;* nous appelerons ainsi l'appareil qui doit corriger ou faire connaître la déviation produite par le fer du vaisseau.

Le *compensateur magnétique* se compose d'une tige *t*, en cuivre rouge, d'un pouce et demi de diamètre, et de deux plaques de fer *f f'*, de 12 ou 13 pouces de diamètre (mesures anglaises), d'une épaisseur telle que le pied carré pèse 3 liv. Ces deux plaques sont séparées par une feuille de carton, et pressées l'une contre l'autre au centre, par l'écrou extérieur de la tige de cuivre ; et sur les bords, par trois petits écrous en fer ; voilà tout l'appareil : on le dispose comme il est représenté dans la figure 276. Alors, la cage en bois emportant le compensateur dans son mouvement de rotation, l'aiguille de la boussole en est affectée diversement dans les différens azimuths, et, par des tâtonnemens, on arrive enfin à lui faire éprouver de la sorte toute la série des déviations qu'elle éprouvait sur le vaisseau. Cela fait, on marque soigneusement la position du centre de la plaque par rapport à l'aiguille de la boussole, et, quand celle-ci a repris sa place sur le vaisseau, on ajuste le compensateur sur le pied qui la porte (*fig.* 275) de manière qu'il ait à son égard exactement la même position.

Par ce moyen, la déviation semble doublée, et non pas corrigée, puisque le compensateur produit un effet justement égal à celui que produit le fer du vaisseau et dans le même sens. Elle est doublée, en effet, et c'est là ce qui donne le moyen de la trouver. D'abord, on enlève le compensateur pour faire une première observation de déclinaison, et l'on trouve, par exemple, 36 degrés à l'ouest. Ensuite, on place le compensateur pour faire une seconde observation, et l'on trouve, par exemple, 40 degrés à l'ouest. Ce second résultat étant plus fort que le premier, c'est une preuve que les actions locales augmentent la déclinaison. La différence $40 - 36 = 4$ fait voir que le compensateur, pour sa part, l'augmente de 4 degrés ; donc le fer du vaisseau l'augmente d'autant ; ainsi, la vraie déclinaison est $36^\circ - 4^\circ = 32$ degrés. Au contraire, si l'observation faite avec le compensateur donnait un moindre résultat, ce serait une

preuve que les actions locales diminuent la déclinaison, et la différence des deux observations devrait s'ajouter à la première pour avoir la déclinaison du lieu. Il faut donc dans tous les cas suivre cette règle générale : faire deux observations, l'une sans compensateur, l'autre avec le compensateur; retrancher la seconde de la première; et, cette différence, *prise avec son signe*, étant ajoutée à la première observation, le résultat sera la déclinaison cherchée.

Cet ingénieux procédé n'est pas sans difficulté dans la pratique.

175. *De l'influence du magnétisme sur la marche des chronomètres.* — Plusieurs marins, habiles observateurs, ont remarqué que leurs chronomètres n'avaient pas la même marche à bord et sur le rivage. Les différences s'élèvent quelquefois de 5″ à 10″ par jour. On conçoit de quelle importance est ce phénomène, puisque toute l'exactitude des observations nautiques et géographiques que l'on peut faire à la mer est dépendante de l'exactitude avec laquelle on mesure le temps. Les chronomètres ayant dans leur construction plusieurs pièces d'acier, et surtout des pièces mobiles qui sont emportées par le balancier, il est naturel de supposer qu'ils sont par-là soumis aux influences magnétiques. En effet, la proximité d'un aimant suffit pour altérer leur marche ; de nombreuses expériences en ont donné la preuve, et l'on a reconnu aussi que des masses de fer doux, aimantées par la terre, produisent le même phénomène. Sur un vaisseau, c'est donc la même cause qui dévie la boussole et qui trouble la marche des chronomètres ; aussi, a-t-on essayé de la neutraliser dans les deux cas par le même moyen : mais, pour les chronomètres, ce qu'il y a jusqu'à présent de meilleur à faire, c'est de les tenir au même lieu, dans la même position, et le plus loin qu'il est possible de toute substance magnétique.

CHAPITRE III.

Des lois et de la théorie du Magnétisme.

176. *Divers moyens de comparer les forces magnétiques.* —Le premier moyen qui se présente pour estimer les forces relatives des aimans naturels ou artificiels consiste à les mettre en contact avec une même pièce de fer que l'on charge ensuite de poids graduellement croissans jusqu'à l'instant où elle se détache, entraînée par le poids total, qui est alors la limite de ce que la force magnétique peut porter. Ce moyen ne peut donner qu'une grossière approximation ; l'insuffisance en fut bientôt reconnue, et cependant il fut à-peu-près le seul dont on fit usage jusqu'en 1780.

A cette époque, Coulomb, par ses belles découvertes, ouvrit de nouvelles routes dans la science, et il donna enfin des méthodes sûres pour mesurer, avec le dernier degré de précision, tous les effets des puissances magnétiques. Dans ce qui va suivre, nous aurons recours aux Mémoires qu'il publia sur ce sujet (tom. 9 des Savans étrangers, Mémoires de l'Académie, 1784, 1785, 1789 ; et Mémoires de l'Institut, tom. 4 et 6).

Coulomb a employé deux moyens différens pour mesurer la force des aimans : 1° les *oscillations* d'une aiguille suspendue à des fils de soie plate ; 2° la *torsion* des fils de cuivre ou d'argent disposés dans un appareil qu'il nommait *balance de torsion*, et qu'on appelle aujourd'hui *balance de Coulomb*.

177. *Oscillations.*—Nous avons déjà dit qu'un aimant qui oscille sous l'influence magnétique de la terre peut être assimilé à un pendule composé ; d'où il suit que, pour trouver la valeur absolue de la force qui le sollicite, il suffirait

de connaître son moment d'inertie par rapport à l'axe de suspension, la position exacte de ses pôles ou de ses centres magnétiques, et le nombre des oscillations qu'il fait dans un temps donné. Mais la force absolue, en vertu de laquelle un aimant accomplit ses oscillations, est un élément complexe dépendant à la fois de l'intensité du magnétisme qu'il possède et de l'intensité du magnétisme que possède le corps qui agit sur lui ; car, l'une ou l'autre de ces intensités devenant double, par exemple, la force résultante serait double aussi, et elle deviendrait quadruple si les deux intensités étaient l'une et l'autre doublées.

Faute de pouvoir déterminer une intensité magnétique d'une manière absolue, nous sommes réduits à comparer entre elles les résultantes totales qui impriment le mouvement. Alors, le problème devient plus simple : les changemens d'intensité n'apportant pas de changemens sensibles dans la position des pôles, l'axe de rotation reste invariable ainsi que les momens d'inertie, et il est permis en conséquence de s'appuyer sur ce principe, que *les forces magnétiques qui sollicitent un aimant sont entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations qu'il exécute dans un temps donné.* D'après cela, nous pouvons comparer les forces magnétiques que possède un corps, soit qu'il puisse osciller lui-même, soit qu'il doive rester fixe dans des positions déterminées.

1°. Pour constater l'état magnétique d'une aiguille, on la suspend horizontalement dans une chape de papier ou de métal à un assemblage de fils sans torsion et l'on compte le nombre n des oscillations qu'il exécute dans un temps donné, dans 10′ par exemple, sous l'influence de la force de la terre ; ensuite, si, par des moyens quelconques, on a changé son intensité, *sans toutefois changer la position de ses pôles*, et que l'on veuille comparer ce second état au premier, il suffit de la suspendre de la même manière, et de compter de nouveau le nombre n' des oscillations qu'elle fait dans le même

temps de 10′ : le rapport de ces deux intensités magnétiques m et m' sera donné par la proportion

$$\frac{m}{m'} = \frac{n^2}{n'^2}.$$

Ce résultat suppose que l'action de la terre a été la même dans les deux cas, ce qui est sensiblement vrai quand on opère dans le même lieu et à des époques qui ne sont pas très-éloignées.

2°. Pour comparer les divers degrés de force d'un aimant qui ne peut être suspendu pour osciller lui-même, on le fait agir, dans ses différens états magnétiques, sur une petite aiguille d'épreuve ayant une grande force coercitive, de peur que son magnétisme ne soit décomposé par influence; mais d'abord on constate l'état de cette aiguille, soumise à l'action seule de la terre. Soit n le nombre des oscillations qu'elle fait dans un temps donné, par l'effet de la composante horizontale m du magnétisme terrestre; soit n' le nombre des oscillations qu'elle fait dans le même temps, sous l'influence de la terre et de l'aimant, m' étant alors la somme des composantes horizontales qui agissent sur elle; soit n'' le nombre des oscillations qu'elle fait, toujours dans le même temps, pour un autre état de l'aimant, m'' étant la somme des composantes horizontales correspondantes.

Pour la première et la seconde expérience, on aura

$$\frac{m'}{m} = \frac{n'^2}{n^2};$$

pour la première et la troisième, on aura

$$\frac{m''}{m} = \frac{n''^2}{n^2}.$$

Mais, en supposant que l'aimant dont on cherche la force soit placé, dans les deux cas, de manière que sa composante horizontale soit aussi dans le méridien magnétique, et conspirante avec celle de la terre, il est évident que sa

force est dans le premier cas $m' - m$, et dans le second cas $m'' - m$: or, la première et la seconde équations donnent respectivement

$$\frac{m' - m}{m} = \frac{n'^2 - n^2}{n^2} \text{ et } \frac{m'' - m}{m} = \frac{n''^2 - n^2}{n};$$

d'où l'on tire

$$\frac{m' - m}{m'' - m} = \frac{n'^2 - n^2}{n''^2 - n^2}.$$

Tel est le rapport des deux composantes horizontales de l'aimant dans les deux états ou dans les deux positions successives où il a été placé par rapport à l'aiguille.

178. *Balance de torsion.*—Lorsqu'un fil de métal est tendu verticalement par un certain poids, il prend une position d'équilibre, et, si l'on fait tourner le poids sur lui-même d'une ou de plusieurs révolutions, ou seulement d'un angle de quelques degrés, le fil éprouve une torsion dans toute sa longueur, et il fait un effort pour revenir sur lui-même et pour ramener le poids à sa position primitive.

Coulomb a étudié le premier cette force de torsion, et nous allons énoncer les lois remarquables auxquelles il a été conduit ; nous reviendrons sur ce sujet dans le livre des Actions moléculaires.

1°. La force de torsion est proportionnelle à l'angle de torsion ;

2°. Elle est, dans un même fil, en raison inverse de sa longueur et indépendante de sa tension ;

3°. Pour des fils de même substance et de différente épaisseur, elle est proportionnelle à la quatrième puissance des diamètres.

Ces lois ont été vérifiées sur les cheveux, sur la soie et sur les fils d'argent, de fer et de laiton, de différens diamètres.

La balance dans laquelle on mesure la force magnétique, par cette force de torsion, est représentée dans les figures

272, 273 et 274 : la figure 272 représente tout l'appareil mis en expérience, la figure 274 est une coupe horizontale correspondant à l'extrémité inférieure du fil, et la figure 273 représente le *micromètre* supérieur. Ce micromètre est composé de la manière suivante : *ss'* est une plaque circulaire qui termine le cylindre *ll'*, elle est percée en son centre d'une large ouverture *o ; mm'* est un disque mobile s'appliquant exactement sur la plaque *ss'*, tournant sur elle à frottement très-doux, et maintenu dans son mouvement de rotation par une petite douille qui s'élève du milieu de *ss' ;* vers le centre *c* du disque *mm'* est un trou triangulaire dont l'un des angles aboutit exactement au centre ; c'est dans cet angle que passe le fil *f l ;* de là il vient s'attacher au treuil *t,* qui est supporté par deux pièces fixes *p* et *p'* sur lesquelles il peut tourner. La plaque *ss'* est divisée sur tout son contour, et le disque *mm'* porte un point de repère qui parcourt ces divisions, et qui indique par conséquent les divers degrés de torsion que l'on donne au fil à son extrémité supérieure.

Dans la figure 272 on voit la pince qui s'attache à l'extrémité inférieure du fil ; elle porte une espèce d'étrier en cuivre mince dans lequel on met les aiguilles aimantées ; et, pour éviter les oscillations trop prolongées, on adapte à l'étrier un volant qui plonge dans un vase rempli d'eau. Sur le contour de la cage, on colle une bande de papier portant des divisions de degrés en degrés, dont la grandeur est déterminée par le prolongement des rayons, tel que *cr, cr',* etc. Le fil doit occuper le centre de ces divisions, et cette condition est remplie quand un rayon visuel quelconque tombe sur deux divisions diamétralement opposées, par exemple, sur 0 et 180, sur 90 et 270, etc.

La balance étant ajustée, on détermine la position d'équilibre du fil, en plaçant dans l'étrier une aiguille non aimantée ; ensuite on y place une aiguille aimantée, de même poids, et l'on tourne le micromètre supérieur dans un sens ou dans l'autre jusqu'à ce que le plan d'équilibre du fil coïncide avec

la direction de cette aiguille ; alors, on est sûr qu'elle est dans le méridien magnétique, et que le fil est sans torsion. Supposons maintenant que l'on tourne le micromètre pour écarter l'aiguille de sa position, pour la porter par exemple en *c'a'* (*fig.* 274) de manière qu'elle forme avec le méridien *mm'* un angle *aca'* de 20°. Soit 180° l'angle dont on le tourne ; le fil à son extrémité inférieure n'ayant marché que de 20°, la torsion qui lui reste est 180° — 20° ou 160° ; c'est cette force qui fait équilibre à la *force directrice* de la terre, c'est-à-dire à la composante horizontale qui tend à ramener l'aiguille dans le méridien magnétique. Soit *m* l'intensité de la force horizontale terrestre *f a'* ; elle peut se décomposer en deux : l'une *p a'* qui se détruit, ou du moins qui ne fait pas tourner l'aiguille ; et l'autre *t a'*, qui est tout entière efficace ; la valeur de celle-ci est *m sin. v*, en représentant par *v* la *déviation av a'*. Au-dessous de 15 à 20°, les angles peuvent sensiblement être pris pour les sinus, et, dans ces limites, la force directrice est donc exprimée par *mv*.

Dans l'exemple qui nous occupe $v = 20°$; ainsi, 20° *m* est la force qui est balancée par une torsion de 160° ; et, puisque la force de torsion est proportionnelle à l'angle de torsion, il en résulte enfin que, pour 1° de déviation, la force directrice serait seulement de $\frac{160}{20} = 8$. En général, nous ramènerons ainsi la force directrice à 1° de distance.

La même aiguille ayant reçu une autre quantité de magnétisme, il faudrait, par exemple, tourner le micromètre de 495° pour l'écarter de 15° : sa force directrice serait alors $\frac{495-15}{15} = \frac{480}{15} = 32$; elle serait donc exactement quadruple de ce qu'elle était dans la première expérience.

Pour déterminer la force d'un aimant qui ne peut être lui-même horizontalement suspendu dans la balance, on le fait agir sur l'aiguille de l'expérience précédente, et, pour plus de simplicité, on le dispose de manière que son centre d'action tombe sensiblement en *a* (*fig.* 274). Alors, on tourne le micromètre pour obtenir une déviation moindre que 20°,

et il est facile de voir comment les expériences s'achèvent, soit que l'aimant qu'on éprouve agisse par attraction, soit qu'il agisse par répulsion. Dans le premier cas, la force directrice est la somme des actions de la terre et de l'aimant; dans le second cas, elle est leur différence.

179. *Les attractions et les répulsions magnétiques sont en raison inverse du carré de la distance.*—Cette loi fondamentale du magnétisme avait été soupçonnée par quelques Physiciens, mais c'est Coulomb qui en a le premier donné la démonstration rigoureuse par les deux méthodes dont nous venons de parler.

1°. *Par les oscillations.* Une petite aiguille d'épreuve, suspendue à un fil de coton, est mise à l'abri des agitations de l'air; elle fait quinze oscillations en 1′. Soit m la force horizontale de la terre qui la sollicite : on fait agir sur elle le pôle attractif d'un long fil d'acier, fortement aimanté, et maintenu verticalement dans le plan du méridien magnétique.

Par des expériences préparatoires on reconnaît que, pour obtenir le plus grand effet possible, il faut que l'extrémité agissante du fil d'acier *dépasse* de 10 lignes environ le plan horizontal de l'aiguille; on supposera donc que le fil est ainsi disposé.

Dans une première expérience, l'aiguille étant à 4 pouces de distance du fil, elle fait 41 oscillations en 1′; soit m' la force qui agit sur elle.

Dans une deuxième expérience, l'aiguille étant à 8 pouces de distance, elle fait 24 oscillations en 1′; soit m'' la force qui agit sur elle. On a

$$\frac{m'}{m} = \frac{(41)^2}{(15)^2} \qquad \frac{m''}{m} = \frac{(24)^2}{(15)^2}.$$

La force horizontale du fil est $m' - m$ dans la première

expérience, et $m'' - m$ dans la seconde, et il résulte des deux équations précédentes :

$$\frac{m' - m}{m'' - m} = \frac{(41)^2 - (15)^2}{(24)^2 - (15)^2} = \frac{1456}{351} = 4,1.$$

Ainsi, dans la deuxième expérience, où la force est à une distance double, son intensité est à-peu-près quatre fois plus petite.

Pour de plus grandes distances on trouve la même loi, pourvu qu'on ait soin de corriger les résultats de l'influence du pôle répulsif du fil, qui devient alors sensible.

2°. *Par la torsion.* Il faut aussi, dans cette méthode, employer des fils très-longs, afin d'éviter l'influence des pôles qui ne sont pas en présence. Les fils de Coulomb avaient 24 pouces de longueur, sur 1 ligne $\frac{1}{2}$ de diamètre. Celui de ces fils qui était dans la balance avait une force directrice de 35° de torsion pour 1° de distance (178); un second fil pareil, et aussi très-fortement aimanté, fut placé verticalement dans la balance, son pôle répulsif en bas, et son extrémité inférieure tombant à un pouce environ au-dessous du niveau de l'autre ; de telle sorte que, si le premier n'eût pas été repoussé, leur point de *recoupement* ou de croisement se serait trouvé à un pouce des extrémités de chacun. Mais le fil suspendu fut chassé vivement, et il ne s'arrêta qu'à 24° du méridien magnétique ; c'est ce que nous appelons sa première position. Pour lui en donner un deuxième, le micromètre supérieur fut tourné de trois circonférences, ou 1080°, et le fil se rapprocha à 17° du méridien. Enfin, pour lui en donner une troisième, le micromètre fut encore tourné de cinq circonférences, ce qui fait en tout huit circonférences ou 2880°, et cette fois il se rapprocha à 12° du méridien.

Dans la première position, l'aiguille suspendue était rappelée dans le méridien par la force terrestre, et par la torsion de 24° du fil. Or, la force terrestre étant, comme nous avons

dit, de 35° de torsion pour 1° d'écart ; pour 24° elle était de 840° qui donnent, ajoutés à 24, une force totale de 864°.

Dans la deuxième position, elle était rappelée par la force terrestre agissant à 17°, et équivalant par conséquent à $35 \times 17 = 595$ degrés de torsion ; et par la torsion du fil qui était de $1020 + 17 = 1097$, ce qui fait 1698.

Dans la troisième position, elle était rappelée par la force terrestre agissant à 13°, et équivalant à $25 \times 12 = 420$; et par torsion qui était de $2880 + 18 = 2892$, ce qui fait 3312.

Ainsi, les distances étant 24, 17 et 12, les forces répulsives correspondantes sont 264, 1098 et 1692, ce qui donne à très peu près la raison inverse du carré des distances.

Il est facile de voir comment la même méthode conduirait à déterminer la loi des attractions.

Ces forces, sur lesquelles nous venons d'opérer, sont, il est vrai, des résultantes de toutes les actions partielles du magnétisme des aimans et du magnétisme de la terre ; mais comme des attractions planétaires qui s'exercent sur des masses prodigieuses on a pu déduire les actions de toutes les molécules de la matière pondérable, de même pour les fluides magnétiques nous pouvons conclure que la loi des résultantes que nous observons est véritablement la loi élémentaire suivant laquelle toutes les parcelles de substance magnétique se sollicitent mutuellement. Ainsi, nous sommes conduits à cette vérité qui doit être le fondement de toute théorie, savoir, que les molécules du même fluide se repoussent, et que les molécules de fluides contraires s'attirent en raison inverse du carré de la distance.

180. *Distribution du magnétisme dans les aimans de différentes formes, et détermination des pôles.*—Les deux méthodes qui viennent de nous conduire à la découverte des lois attractives et répulsives du magnétisme peuvent nous servir encore à la détermination des intensités magnétiques en chaque point d'une aiguille aimantée.

Une petite aiguille d'épreuve, de 6 lignes de longueur, suspendue à un fil de cocon, fait n oscillations en 1′, sous l'influence de la force m, composante horizontale de la terre. On lui présente, à la distance de quelques lignes, un fil aimanté vertical $a\,b$ (*fig.* 251), qui ne la détourne point du méridien, mais qui la fait osciller plus vivement; elle exécute alors n' oscillations en 1′. Soit m' la force qui la sollicite. A une petite distance, la section s' qui se trouve vis-à-vis l'aiguille et les sections voisines, telles que a' et b', agissent avec toute leur énergie, tandis que les autres agissent avec une obliquité toujours croissante, et par conséquent avec une force toujours moindre. Nous pouvons donc considérer la force actuellement agissante de l'aimant comme appartenant à la section s'. De même, si nous présentons l'aiguille à la même distance, vis-à-vis la section s'', nous aurons n'' oscillations en 1′; m'' étant la force qui produit cet effet, nous aurons

$$\frac{m'-m}{m''-m}=\frac{n'^2-n^2}{n''^2-n^2}.$$

Les forces $m'-m$ et $m''-m$ sont les intensités magnétiques de l'aimant, pour les points qui sont en présence de l'aiguille, et nous pouvons de la sorte comparer les intensités des différentes tranches dans toute la longueur des fils ou des barreaux aimantés. Seulement, quand on arrive vis-à-vis l'extrémité a, il faut doubler l'effet obtenu, puisqu'on aurait visiblement un effet double, si l'aimant se continuait encore et donnait au-dessous de a des tranches aussi efficaces que celles qui sont au-dessus. On peut exprimer géométriquement ces résultats en élevant sur les diverses tranches des perpendiculaires qui représentent les intensités observées. Les extrémités de ces perpendiculaires formeront une courbe que l'on appelle la courbe des intensités, et qui indique à l'œil toute la distribution des fluides magnétiques. La figure 250 représente la courbe trouvée par Coulomb, pour

un fil d'acier dont *am* est la demi-longueur. Au milieu l'intensité est nulle, et de là elle va croissant jusqu'à l'extrémité. Pour les fils ou pour les lames de longueur différente, cette courbe est exactement la même, pourvu que la longueur surpasse 6 ou 8 pouces ; elle ne fait alors que se transporter vers les extrémités, laissant vers le milieu un espace plus ou moins grand où l'intensité est sensiblement nulle. Il résulte de là cette propriété remarquable : qu'au-dessus de 6 ou 8 pouces de longueur, tous les aimans de même force ont leurs pôles à la même distance des extrémités, car, les pôles n'étant que les points d'application des résultantes totales, ces points sont placés de la même manière, dès que les intensités ou les composantes partielles suivent la même loi.

De plus, Coulomb a fait voir, par le calcul, que les pôles se trouvent à dix-huit lignes des extrémités ; et, en même temps, il a donné, pour les aimans très-courts, cette autre loi : que leurs pôles sont à-peu-près au tiers de la demi-longueur, ou au sixième de la longueur totale, en partant des extrémités. Ce dernier résultat est une sorte de limite dont les pôles s'approchent de plus en plus à mesure que la longueur diminue. Ainsi, pour une aiguille de trois pouces, par exemple, les pôles seront à une distance un peu plus grande que 6 lignes, c'est-à-dire à 7 ou 8 lignes.

Ces résultats supposent que les aimans ont des dimensions transversales très-petites par rapport à leur longueur, qu'ils sont d'une forme régulière dans toute leur étendue, et aussi qu'ils sont régulièrement aimantés. Quand ces conditions ne sont pas remplies, on ne peut plus connaître les pôles théoriquement ; il faut alors les chercher directement avec la petite aiguille d'épreuve. Dans les losanges, les pôles se rapprochent du centre ; dans les aiguilles en flèche qu'on a coutume d'employer, il est difficile d'avoir une aimantation régulière et des pôles constans ; dans les plaques larges ou épaisses par rapport à leur longueur, il y a généralement des pôles multiples ou des points conséquens ; enfin, dans

les anneaux d'acier très-homogènes, on peut obtenir des pôles ou diamétralement ou irrégulièrement opposés; mais l'aimantation régulière ne laisse apercevoir au-dehors aucune trace de magnétisme; cette propriété est une conséquence de la théorie dont nous allons essayer de donner une idée.

181. *Théorie du magnétisme.* — Les anciens ne connaissaient de l'aimant que son attraction pour le fer, et c'est sur ce seul fait que pouvaient rouler leurs explications : or, dans tous les siècles, quand on a voulu à toute force expliquer un fait unique en son espèce, on n'a pu faire autre chose que d'exprimer le fait lui-même, par des mots vagues et métaphoriques, ou d'exprimer quelque liaison qu'on lui suppose avec un autre fait plus général. Thalès et Anaxagore disaient donc que l'aimant est doué d'une ame capable d'attirer et de mouvoir le fer; Cornélius Gemma (1535), qu'il y avait entre le fer et l'aimant des fils rayonnans invisibles; d'autres, qu'il y avait une sympathie; d'autres, une similitude; d'autres une différence de parties : toutes explications qui n'expriment que le fait. Épicure supposait que les atomes de fer conviennent à ceux de l'aimant, et qu'ils s'accrochent; Plutarque imaginait qu'il y avait autour de l'aimant une émanation capable de faire le vide; d'autres aimaient mieux supposer des vapeurs; Cardan prétendait que le fer est attiré parce qu'il est froid; et Costeo de Lodi, médecin, regardait le fer comme la nourriture de l'aimant : en comparant ainsi les phénomènes magnétiques à quelque autre phénomène naturel, on pouvait multiplier les hypothèses, et l'on n'a pas manqué de les multiplier à l'infini. Gilbert fut assez hardi pour condamner toutes ces explications et autres pareilles; en même temps, il fut assez bon philosophe pour n'en proposer aucune à leur place. Descartes vint ensuite avec ses tourbillons et sa matière cannelée : comme il expliquait tout, il expliqua le magnétisme; son système fut adopté, et, pendant plus d'un siècle, il fut couronné dans les ouvra-

ges de ses disciples. Descartes suppose qu'un tourbillon de matière subtile passe rapidement sur la terre, allant de l'équateur vers chacun des pôles ; la matière ne l'arrête pas parce qu'elle est poreuse, mais les substances magnétiques, ayant des molécules rameuses fort mêlées et tissues ensemble, opposent au tourbillon une résistance plus grande que tous les autres corps ; voilà pourquoi elles sont dirigées. Cependant le tourbillon passe plus facilement dans un sens que dans l'autre, car il y a toujours une des extrémités qui se tourne de préférence vers le nord. Donc, ajoute Descartes, les pores du fer sont hérissés de poils qui cèdent et se courbent quand le tourbillon entre par un côté, mais qui se hérissent quand il veut entrer par le côté opposé. Au lieu de poils on peut concevoir des valvules ou un autre empêchement quelconque. Telles sont les idées fondamentales du système par lequel on a expliqué les phénomènes magnétiques jusqu'au temps d'Æpinus. Nous ne savons aujourd'hui ce qui doit le plus nous étonner, ou que la puissante intelligence de Descartes ait inventé de telles explications, et s'y soit arrêtée, ou que cent ans après ce philosophe, les hommes les plus éminens de leur siècle, comme Euler et Daniel Bernouilli, n'aient pu que reproduire ce système, en le fortifiant de leur autorité et de leur approbation.

Æpinus éssaya enfin de soumettre au calcul tous les phénomènes magnétiques, et de montrer qu'ils peuvent se déduire des simples lois de l'attraction et de la répulsion ; c'était revenir à la vraie méthode expérimentale, et soulever cette espèce de voile dont l'esprit de système enveloppe la réalité des choses.

Æpinus n'avait admis qu'un seul fluide magnétique : après lui, et tout en conservant ses principes, on supposa qu'il y avait deux fluides différens ; que leur combinaison faisait l'état naturel, et leur séparation l'état magnétique : mais l'on supposait que ces fluides, une fois séparés, pouvaient traverser les corps et se répandre dans leur masse.

Enfin, Coulomb posa les vrais principes de la théorie que nous admettons aujourd'hui ; il conserva les deux fluides, mais il fit voir que ces fluides ne peuvent éprouver dans les corps qu'un déplacement insensible : c'est ce qui résulte en effet des expériences que nous avons rapportées. Ainsi, nous supposons 1° que le *volume apparent* d'une substance magnétique se trouve composé d'une multitude de petits espaces, dans lesquels il y a du magnétisme, et d'une multitude d'autres petits espaces où le magnétisme n'existe pas ; 2° que les deux fluides contenus dans chaque petit espace magnétique peuvent être séparés quand la force qui les sollicite est capable de vaincre la force coercitive ; qu'ils peuvent s'arranger suivant les lois voulues par l'équilibre, mais qu'ils ne peuvent jamais sortir de la petite étendue dans laquelle ils ont été primitivement enfermés ; tout ce qui les environne leur est imperméable.

Les petits espaces où il se trouve du magnétisme s'appellent les *élémens magnétiques;* les petits espaces où il ne s'en trouve pas s'appellent les *élémens non magnétiques*. Nous ne savons pas si les élémens magnétiques sont les intervalles qui séparent les atomes de la matière pondérable, ou s'ils sont les atomes eux-mêmes, et nous ne savons pas non plus s'ils sont des intervalles d'une agrégation d'atomes ou d'une molécule secondaire, ou s'ils sont les agrégations ou les molécules elles-mêmes. La somme des élémens magnétiques et celle des élémens non magnétiques forment le volume apparent d'un corps ; le rapport de ces deux sommes peut changer avec la température et avec la nature des substances, et ces changemens ont une grande influence sur la distribution et sur l'intensité du magnétisme.

M. Poisson a soumis au calcul ces hypothèses de Coulomb ; mais il ne nous est pas possible de donner ici une idée de sa savante analyse.

CHAPITRE IV.

Des procédés d'aimantation, et des causes qui modifient la force coercitive.

182. *Procédé de Duhamel* ou *de la touche séparée.* — Ce procédé consiste à disposer bout à bout, sur une même ligne et à une certaine distance (*fig.* 255), deux puissans faisceaux, *f* et *f'*, dont les pôles opposés se regardent (on n'a représenté que leurs extrémités, ils sont pareils à celui de la figure 249). Sur ces faisceaux, qui restent *fixes* pendant l'expérience, on place l'aiguille à aimanter de telle sorte qu'elle empiète au plus de 15 à 18 lignes sur chaque extrémité, ou seulement de 7 à 8 lignes si elle n'a que 3 ou 4 pouces de longueur. Alors, on prend les deux barreaux glissans, *g* et *g'*, l'un dans la main droite, l'autre dans la main gauche ; on les pose au milieu de l'aiguille, on les incline sur elle de 25 ou 30°, et, en les séparant, on les fait glisser sous cette inclinaison, d'un mouvement lent et uniforme, pour qu'ils arrivent en même temps à chacune de ses extrémités; là, on les *relève*, on les rapporte au milieu, et l'on répète la même opération jusqu'à ce que l'aiguille ait reçu le nombre des frictions nécessaires. Quand l'aiguille est trop mince ou trop fragile pour supporter le poids des barreaux glissans, on la soutient par une pièce de bois *l*, sur laquelle on peut même la fixer pour qu'elle n'éprouve aucun déplacement pendant l'opération. Il est évident que chacun des barreaux *g* et *g'* doit toucher l'aiguille par le même pôle que le barreau fixe vers lequel il marche. Ce procédé est le plus avantageux pour aimanter, de la manière la plus complète et la plus régulière. les aiguilles de boussoles et les lames dont l'épaisseur ne dépasse pas 4 ou 5 millimètres.

183. *Procédé d'Æpinus* ou *de la double touche.* — Quand les lames ont une épaisseur plus grande que 4 ou 5 millimètres, la méthode dont nous venons de parler est insuffisante pour les aimanter à saturation, et il est nécessaire alors de recourir au procédé d'Æpinus, qui ne diffère du premier que par la disposition et le mouvement des barreaux glissans. Ces barreaux sont encore l'un et l'autre posés au milieu de la lame, chacun la touchant par le pôle de même nom que celui de l'aimant fixe, dont il est le plus voisin (*fig.* 254); mais, cette fois, leur inclinaison sur elle est seulement de 15 ou 20°, et on les promène *ensemble*, du milieu vers l'une des extrémités, puis de cette extrémité vers l'autre, en parcourant toute la longueur de la lame; on répète ainsi les frictions ou le mouvement de *va-et-vient*, d'un bout de la lame à l'autre, avec la double condition de finir toujours au milieu, et d'y arriver en revenant de l'extrémité de droite si on a commencé les frictions en allant vers la gauche ou réciproquement; c'est le seul moyen de passer le même nombre de fois sur chaque moitié. Pour rendre cette manœuvre plus commode, on peut fixer les aimans glissans dans une espèce de triangle en bois ou en cuivre; mais, dans tous les cas, il faut avoir soin de laisser entre leurs extrémités inférieures une distance de 5 ou 6 millimètres, qui se conserve toujours la même, au moyen d'une petite lame *l* de bois, de cuivre, ou de plomb.

Ce procédé fut imaginé par Æpinus, dont il conserve le nom, et on l'appelle aussi *procédé de la double touche*, parce que les barreaux glissans *touchent à la fois* la même moitié de la lame qu'on aimante, tandis que, dans le procédé de Duhamel, ils *touchent séparément* chacune de ses moitiés.

La double touche est préférable à *la touche séparée* lorsqu'il s'agit d'aimanter des barreaux épais, parce qu'elle y développe une plus grande quantité de magnétisme : mais elle ne doit jamais être employée lorsqu'il s'agit des aiguilles de boussole ou des lames destinées à des recherches de pré-

cision, parce qu'elle présente deux inconvéniens qu'il faut alors soigneusement éviter : premièrement, elle donne *toujours* des pôles d'une force inégale; secondement, elle donne souvent des points conséquens, surtout quand les lames ont une grande longueur.

184. *Du point de saturation.* — La quantité de magnétisme que *prend* un corps va toujours croissant avec la force des barreaux qui servent à l'aimanter, mais la quantité de magnétisme qu'il *conserve* est susceptible d'une certaine *limite*, que l'on appelle *le point de saturation.* Par exemple, une aiguille qui fait seulement 100 oscillations en 100″ lorsqu'on l'aimante avec de faibles barreaux, peut faire ces 100 oscillations en 90″, en 80″, en 70″, etc., lorsqu'on l'aimante par l'une ou l'autre des méthodes précédentes, avec des barreaux fixes ou glissans d'une force graduellement croissante. Mais ensuite, abandonnée à elle-même après chacune de ces opérations, elle présente les phénomènes suivans : au-dessous d'une certaine intensité magnétique, de celle, par exemple, qui répond à 100 oscillations en 40″, elle conserve tout le magnétisme qu'elle a reçu, c'est-à-dire qu'après des mois ou des années, elle mettra à faire 100 oscillations le même temps qu'elle mettait immédiatement après l'aimantation; mais les intensités plus grandes, celles qui lui font faire 100 oscillations en 30″ ou en 20″, décroîtront plus ou moins rapidement avec le temps ; l'aiguille retombera enfin au point de faire ses 100 oscillations en 40″, et cette limite d'intensité sera son point de saturation. Il est évident, d'après cela, que le point de saturation d'une lame ou d'une aiguille ne dépend que de sa force coercitive, et nullement de la force des aimans qui ont servi à développer son magnétisme.

On prétend, en général, que les corps *sursaturés* de magnétisme retombent *immédiatement* au point de saturation : mais, dans le cours de mes recherches magnétiques, j'ai pu observer des corps très-variés dans leur nature, dans leurs dimensions et dans les degrés de leur force coercitive, et j'ai

toujours éprouvé que le point de saturation n'est pas une limite aussi fixe qu'on le suppose : premièrement, il y a toujours après l'aimantation *une réaction des fluides*, qui change leur arrangement et qui augmente quelquefois l'intensité magnétique ; secondement, les aiguilles sursaturées perdent très-lentement l'excès de leurs fluides, et il n'est pas rare, après plusieurs mois, de les voir encore éprouver quelques légères variations. Il est inutile d'ajouter qu'il faut dans ces observations tenir compte des changemens de température et des autres causes accidentelles qui pourraient avoir de l'influence sur les intensités magnétiques.

Pour reconnaître qu'une aiguille est aimantée à saturation, il n'y a d'autres moyens que de la *réaimanter dans le même sens* avec des barreaux plus puissans que ceux qui l'ont aimantée la première fois. Si elle prend alors une intensité beaucoup plus grande, ce dont on s'assure par l'une des méthodes que nous avons indiquées, il est certain qu'elle n'était pas saturée, et si elle ne prend qu'une faible augmentation d'intensité, qu'elle perd ensuite avec le temps, ce sera une preuve qu'elle était portée au point de saturation.

Il ne faudrait pas croire que l'on pût augmenter indéfiniment l'intensité magnétique d'une aiguille, en lui donnant un grand nombre de frictions avec de faibles barreaux : passé un certain terme, les nouvelles frictions n'ajoutent rien, et ce terme arrive quand la résistance de la force coercitive est égale à la puissance décomposante des barreaux.

Il ne faudrait pas croire non plus qu'une aiguille, aimantée par de puissans barreaux, pût, sans inconvénient, être réaimantée ensuite par des barreaux glissans, d'une moindre insensité ; car ceux-ci, même quand ils agissent dans le même sens que les premiers, lui font perdre peu-à-peu de son magnétisme et le ramènent enfin au degré d'intensité qu'ils auraient pu lui donner. Cet effet remarquable est une nouvelle preuve que les barreaux glissans ne magnétisent

qu'en déterminant, dans chaque molécule, des décompositions et des recompositions successives des deux fluides.

185. *De l'influence de la trempe sur la force coercitive* — Le plus sûr moyen de tremper l'acier à divers degrés, comparables entre eux, est de lui donner d'abord la *trempe la plus dure*, et ensuite de le *recuire* graduellement jusqu'à un point déterminé; en sorte que *les divers degrés de trempe* ne sont véritablement que *les divers degrés de recuit.*

Pour donner à un barreau d'acier la trempe la plus dure, on le chauffe jusqu'au rouge *cerise clair*, et on le jette rapidement dans une grande masse d'eau froide. Le prompt refroidissement fait la trempe. Ainsi, pour qu'il reçoive une trempe égale, et pour qu'il ne se *tourmente* pas, il importe que le froid l'enveloppe et le saisisse instantanément dans toutes ses parties. On peut tremper l'acier dans l'huile, dans le suif, dans le mercure, dans la glace, dans des dissolutions de différentes substances, ou même dans les mélanges réfrigérans : ces divers modes de refroidissement paraissent avoir de l'influence sur les propriétés mécaniques des ressorts, des tranchans ou des pointes, mais ils ne paraissent pas modifier sensiblement les propriétés magnétiques de l'acier.

Pour *recuire* l'acier trempé, on le chauffe uniformément sur un lit de charbon pulvérisé, ou simplement concassé en fragmens plus ou moins gros, suivant le recuit que l'on veut obtenir. La grande difficulté est de mesurer alors les divers degrés de chaleur : mais l'acier jouit d'une propriété remarquable, qui permet d'évaluer avec assez d'approximation la température qu'il éprouve. Lorsqu'on le chauffe de la sorte, sa surface prend de vives couleurs qui se succèdent assez lentement, à mesure que la chaleur augmente : d'abord, au brillant éclat du métal succède une nuance de jaune clair ou *jaune paille ;* à une température un peu plus haute cette nuance tourne à l'*orangé*, puis à l'*orangé foncé*, ensuite au *rouge violet*, puis au *bleu vif*, puis à une couleur verdâtre,

très-éclatante, que l'on appelle *couleur d'eau*. Ces nuances, parfaitement distinctes, correspondent à des températures qui ne sont pas évaluées en degrés centigrades, mais qui sont telles qu'il existe plus de deux cents degrés de différence entre le jaune paille et la couleur d'eau. La première de ces nuances paraît répondre à à-peu-près 200°, et la seconde à environ 450°. Ensuite on peut pousser le recuit jusqu'au *rouge sombre*, au *rouge*, au *rouge cerise*, au *rouge cerise clair*, qui fait disparaître toute espèce de trempe, quand, au sortir de cette température, l'acier se refroidit librement dans l'air.

Pour déterminer maintenant l'influence de la trempe, on prend une lame d'acier, on la trempe au cerise clair, on l'aimante à saturation, et l'on observe ensuite le temps qu'elle met à faire 100 oscillations ; puis on la recuit successivement jusqu'au jaune paille, à l'orangé foncé, au bleu et à la couleur d'eau, etc., en la retirant après chaque degré de recuit, pour l'aimanter à saturation, et lui faire faire 100 oscillations dont on observe la durée. Il est évident que les diverses intensités magnétiques de cette lame seront entre elles en raison inverse des carrés des temps observés. C'est ainsi que l'on arrive à constater par l'expérience : 1° que les lames qui ont reçu la trempe la plus dure sont douées de la plus grande force coercitive, et prennent par conséquent la plus grande intensité magnétique lorsqu'on les aimante avec des barreaux assez puissans ; 2° que les lames recuites au bleu des ressorts, ou même à la couleur d'eau, conservent assez de force coercitive pour prendre une grande intensité magnétique. Or, l'acier trempé dur étant cassant comme du verre, il y a toujours de l'avantage à recuire les aiguilles jusqu'au bleu, puisqu'on ne perd que peu de chose en intensité magnétique, et que l'on évite ainsi tous les accidens qui pourraient provenir d'une rupture ou de quelques changemens de forme.

Il faut cependant remarquer que l'acier ne se comporte

pas toujours comme nous venons de le dire : quelquefois il prend inévitablement des points conséquens lorsqu'il est trempé dur ; d'autres fois, il ne prend le maximum d'intensité magnétique qu'après avoir été recuit jusqu'au rouge sombre ou même jusqu'au rouge.

186. *Influence de la chaleur sur le magnétisme.* — Nous avons déjà dit qu'un aimant artificiel ou naturel, chauffé jusqu'au rouge blanc, perd complètement son magnétisme, de telle sorte qu'il n'est plus, après le refroidissement, qu'un corps inerte, sans force directrice et sans force magnétique : cette observation est fort ancienne, elle avait été faite par Gilbert. Mais, en perdant ainsi leurs fluides libres, ces corps ne perdent pas la propriété de redevenir magnétiques lorsqu'on les aimante de nouveau par les procédés que nous avons fait connaître ; seulement, leur force coercitive est changée : celle des aimans naturels est diminuée sans qu'on puisse la reproduire, et celle des aimans artificiels est détruite jusqu'à ce qu'elle ait été rétablie par une nouvelle trempe.

Cette recomposition du magnétisme, par l'influence de la chaleur, ne se fait pas subitement à la température rouge : elle se fait graduellement à mesure que la température s'élève. Pour s'en assurer, on prend un barreau aimanté, dont on observe la force en comptant la durée d'un certain nombre d'oscillations ; puis on le porte successivement à divers degrés de chaleur, et, à chaque fois, on le laisse refroidir pour observer de nouveau son intensité magnétique : toutes ces intensités forment une série décroissante, depuis le point de départ jusqu'à la plus haute température à laquelle on arrive.

M. Kupffer, qui a fait de nombreuses observations sur ce sujet, explique d'une manière satisfaisante tous les résultats qu'il a obtenus, en supposant que chaque degré d'élévation de température augmente de la même quantité la durée d'un même nombre d'oscillations. Par exemple, de 0 à 30° R.,

chaque degré de température augmente d'une demi-seconde la durée de 300 oscillations d'une aiguille qui fait, à 10°, 300 oscillations en 784″,5. Mais les expériences ne comprennent pas encore jusqu'à présent une assez grande étendue de l'échelle thermométrique pour qu'on puisse appliquer cette loi avec une entière confiance.

M. Kupffer a aussi remarqué qu'il faut un temps très-long pour qu'une température donnée achève sur un barreau toute la recomposition qu'elle est capable de produire. Par exemple, une aiguille qui a été plongée à plusieur s reprises dans l'eau bouillante, où elle restait 10′ à chaque fois, n'a perdu qu'à la sixième immersion tout le magnétisme qu'elle pouvait perdre : d'abord, elle ne mettait que 578″ à faire 200 oscillations ; après la 1re immersion, elle mettait 637″,5 ; après la 2e, 642 ; après la 3e, 645 ; après la 4e, 647 ; après la 5e, 650,5 ; après la 6e, 652 ; et aussi 652 après la 7e.

Voici un autre effet de la chaleur, auquel on n'a pas fait assez d'attention : à la température du rouge cerise, les aimans, l'acier et le fer, perdent non seulement le magnétisme libre qu'ils peuvent posséder, mais de plus ils deviennent incapables d'en recevoir la moindre trace ; pendant tout le temps qu'ils sont soumis à cette température, ils paraissent comme du bois ou de la pierre, tout-à-fait insensibles à l'action décomposante des plus forts barreaux. Ainsi, les aimans, l'acier et le fer ont une *limite magnétique*, et cette limite se trouve à-peu-près vers la température du rouge cerise.

Quelques analogies assez remarquables entre les distances des atomes des corps et leurs propriétés magnétiques m'avaient conduit à penser que la limite magnétique des différens corps devait se trouver à des températures très-différentes, et j'ai, en effet, démontré par l'expérience :

1° Que le cobalt ne cesse jamais d'être magnétique, ou plutôt que sa limite magnétique est à une température plus haute que le rouge blanc le plus éclatant ;

2° Que le chrôme a sa limite magnétique un peu au-dessous de la température rouge sombre ;

3° Que le nickel a sa limite magnétique vers 350°, à-peu-près à la température de la fusion du zinc ;

4° Enfin, que le manganèse a sa limite magnétique à la température de 20 à 25° au-dessous de 0°.

Les expériences sur les cinq corps simples magnétiques, le manganèse, le nickel, le chrôme, le fer et le cobalt, semblent prouver :

1° Que la chaleur n'agit sur le magnétisme que par la distance plus ou moins grande qu'elle détermine entre les atomes des corps ;

2° Que toutes les substances deviendraient magnétiques si l'on pouvait, par une action quelconque, rapprocher leurs atomes à une distance convenable.

Voilà, à-peu-près, tout ce que nous connaissons jusqu'à présent des influences de la chaleur sur les fluides magnétiques ; il faut espérer qu'un si beau et si vaste sujet de recherches ne sera pas long-temps négligé, et que bientôt on en pourra faire sortir quelque découverte fondamentale.

187. *Des causes qui peuvent aimanter les substances magnétiques.* — Nous venons de voir que la chaleur est une cause très-efficace pour déterminer la recomposition du magnétisme libre, mais elle est tout-à-fait impuissante pour déterminer la séparation des fluides ; du moins, il a été impossible jusqu'à ce jour d'obtenir par la chaleur la moindre trace d'aimantation, même dans les corps où l'équilibre magnétique est le plus facile à rompre. Ainsi, le magnétisme et la chaleur sont des agens naturels qui paraissent n'avoir aucune prise directe l'un sur l'autre.

La lumière ne paraît pas plus efficace que la chaleur pour déterminer une séparation des fluides magnétiques. Il est vrai que quelques observateurs, et particulièrement M. Morichini, ont cru reconnaître un pouvoir magnétisant dans les rayons solaires : mais j'ai apporté beaucoup de soins à

répéter ces expériences sans découvrir aucune action sensible; MM. Reiss et Moser n'ont pas été plus heureux. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, *t.* XLII, *p.* 304.)

Il n'en est pas de même de l'électricité, elle agit sur le magnétisme avec une puissance remarquable. C'est la découverte de cette action qui a fait naître l'*électro-magnétisme*, branche nouvelle de la science que nous devons étudier après l'électricité, et qui a reçu en peu d'années d'immenses développemens.

188. *Des aimans artificiels et naturels.* — Nous avons déjà dit qu'on appelle en général aimans naturels les substances qui sont aimantées au sortir du sein de la terre, et aimans artificiels toutes les substances dans lesquelles nous parvenons, par nos procédés, à fixer du magnétisme. Un aimant naturel, chauffé au rouge, et réaimanté après cette opération, serait un véritable aimant artificiel. En donnant les procédés d'aimantation et les moyens de changer et augmenter la force coercitive, nous avons donc donné les méthodes d'après lesquelles les aimans doivent être composés; nous n'avons plus à présent qu'à faire connaître comment on peut les conserver, et comment on peut les assembler pour augmenter leur puissance.

Les aiguilles, les lames et les barreaux de toute espèce, sont des aimans d'une seule pièce, qui, étant une fois aimantés à saturation, conservent très-bien leur magnétisme; cependant, les lames et les barreaux pouvant être disposés de différentes manières à l'égard de la force terrestre, cette force peut, dans des circonstances favorables, déterminer une recomposition partielle des fluides. Par exemple, dans nos climats, un barreau qui serait tenu verticalement, son pôle boréal en bas, éprouverait une diminution magnétique, et si, dans cette position, il recevait quelques chocs ou quelques coups de marteau, il pourrait en peu de temps être réduit à une force très-faible ou même prendre des pôles contraires. C'est pour empêcher ces recompositions que l'on

emploie les *armatures*. On appelle en général *armures* ou *armatures* des pièces de fer doux qui sont mises en contact avec les aimans pour maintenir leur activité par la décomposition magnétique qu'elles éprouvent. Pour armer des barreaux, on les dispose parallèlement dans leurs boîtes, de manière que les pôles contraires se correspondent, et, aux deux extrémités, on ajoute transversalement deux prismes quadrangulaires de fer doux qui complètent le parallélogramme. Chacune de ces pièces de fer devient ainsi un aimant qui réagit sur les barreaux pour y fixer les fluides décomposés.

Les aiguilles qui sont en activité ne peuvent point recevoir d'armature, mais elles n'en ont pas besoin puisqu'elles se tournent sans cesse pour obéir à la force qui les sollicite; c'est cette force elle-même qui leur sert d'armature.

Les *faisceaux magnétiques* sont des assemblages de plusieurs lames dont les armatures exigent beaucoup plus de soin. La figure 249 représente un faisceau construit d'après les méthodes de Coulomb : il se compose de 15 lames rectangulaires, disposées en 3 couches de chacune 3 lames. Les lames de la couche supérieure et celles de la couche inférieure sont plus courtes de 2 pouces et demi ou 3 pouces que celles de la couche moyenne; ce qui donne à chaque extrémité un retrait de 15 ou 18 lignes. Toutes ces lames, qui sont du reste pareilles dans leurs dimensions, s'ajustent dans les pièces de fer *f*, qui servent d'armature; un lien en cuivre *cc'* les retient à chaque bout et les presse de manière que le système entier soit parfaitement immobile. Ces grands faisceaux sont destinés à être fixes lorsqu'on s'en sert pour aimanter; on construit, sur les mêmes principes, des faisceaux glissans qui ont une moindre longueur et qui ne se composent que de 6 ou 9 lames.

La figure 246 représente un aimant en *fer-à-cheval* : c'est un assemblage de plusieurs lames qui sont immédiatement superposées. Après les avoir trempées, on les recuit, et on

les dresse de manière qu'elles puissent s'appliquer exactement l'une sur l'autre; deux vis *v* et *v'*, en fer ou en cuivre, les retiennent dans cette position. Ces lames sont aimantées séparément avant d'être assemblées: pour cela, on les met en prise, aux deux bouts, avec les pôles contraires de deux puissans barreaux, et, en partant du milieu ou du sommet de la courbure, on fait, par la méthode de la double touche, autant de frictions qu'il est nécessaire. Un anneau *nn'* sert à suspendre l'aimant, et une pièce de fer doux *pp'*, qu'on appelle *le portant* ou *le contact*, reste toujours en prise avec les deux pôles contraires *a* et *b*. Le portant n'a en général que le tiers de l'épaisseur de l'aimant, et il est légèrement arrondi sur sa surface de contact, de telle sorte qu'il ne touche l'aimant que par une seule ligne. Les aimans bien faits peuvent soutenir, au moyen du portant, jusqu'à 10 ou 20 fois leur poids.

Les armatures des aimans naturels sont représentées dans les figures 247 et 248 : les parties *l, l'* sont les *ailes* de l'armature ; et les parties *p, p'* en sont les *pieds*. On donne aux ailes une largeur égale à celle de l'aimant, et une épaisseur d'environ une ligne; les dimensions des pieds dépendent de la force de l'aimant, et ce n'est que par des essais successifs que l'on peut arriver à la forme et à la grandeur la plus convenable.

On a observé sur les aimans naturels un phénomène dont il n'existe aucune explication plausible : c'est la *faiblesse* qu'ils éprouvent lorsqu'on *les surcharge*. Supposons qu'un aimant puisse porter 20 kilogrammes assez facilement : si on le charge de ces 20 kilogrammes, et que chaque jour on y ajoute un petit poids, on pourra graduellement augmenter la charge, au point de la porter à 30, ou peut-être à 40 kilogrammes. Mais, dès que le contact se détache, entraîné par l'excès du poids, il est impossible de le faire reprendre : l'aimant ne veut plus *mordre*, et il faut revenir à une charge moindre que les 20 kilogrammes du point de départ pour

que l'aimant la puisse porter ; cependant, avec des précautions et du temps, on parviendra à le *nourrir* de nouveau et à lui rendre sa première vigueur.

Lorsqu'au lieu d'aimanter des aiguilles ou des prismes, on aimante des lames très-larges et peu épaisses, il est facile d'y varier la distribution magnétique d'une infinité de manières : en prenant, par exemple, des plaques de tôle d'acier de 8 ou 10 pouces carrés et de 1 ligne ou demi-ligne d'épaisseur, et, en traçant sur leur surface avec un aimant assez fort des figures quelconques, on peut rendre ces figures apparentes en répandant de la fine limaille de fer avec un tamis sur la face aimantée de la plaque. M. de Haldat a publié un mémoire intéressant sur ce sujet (*Ann. de Phys. et de Chim.*, t. XLII, pag. 33). Les figures deviennent plus saillantes sur les plaques étamées, et, pour les faire disparaître, il suffit de chauffer jusqu'à la fusion de l'étain.

FIN DE LA PREMIÈRE SECTION.

DEUXIÈME SECTION.

DE L'ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE PREMIER.

Des Actions électriques.

189. *Il y a des substances qui prennent, par le frottement, la propriété d'attirer les corps légers.*—Il est facile de s'assurer que les diverses substances, prises dans leur état naturel, n'ont aucunement la propriété d'attirer les petits fragmens de feuilles d'or ou de clinquant, ni la sciure de bois ou de moelle de sureau, ni les barbes de plume, ni d'autres corps légers, quels qu'ils soient : mais lorsque, avec une étoffe de laine ou de soie, on frotte un tube de verre, un bâton de soufre ou de résine, un morceau d'ambre ou de succin, ces différens corps prennent à l'instant une propriété très-remarquable : ils attirent à eux tous les corps légers qu'on leur présente, et cette attraction est si forte que les minces feuilles de métal, par exemple, sont enlevées à plus d'un pied de distance et viennent se précipiter sur la surface du corps attirant (*fig.*281). La cause de ce phénomène est ce que l'on appelle *l'électricité*, du mot grec ἤλεκτρον, qui signifie *ambre*, parceque la propriété dont il s'agit fut autrefois découverte dans cette substance par les philosophes grecs.

Pour distinguer avec plus de certitude les corps qui deviennent électriques par le frottement, on emploie divers

appareils que l'on appelle en général *électroscopes*, c'est-à-dire instrumens propres à découvrir l'électricité.

Le plus simple des électroscopes est le *pendule électrique*, qui se compose d'une petite balle de sureau, suspendue à l'extrémité d'un fil de soie ou d'un fil de métal très-fin (*fig.* 279). Lorsqu'on veut éprouver un corps, on l'approche de la balle, et, s'il ne peut pas l'attirer à lui d'une quantité sensible, on est assuré qu'il n'a point d'électricité, ou plutôt qu'il n'en peut avoir qu'une très-faible charge.

L'aiguille électrique (*fig.* 280) est un autre électroscope un peu plus *sensible* que le pendule : elle se compose d'un fil de cuivre, terminé par deux boules métalliques, *b* et *b'*, qui doivent être creuses pour être plus légères ; au milieu de la longueur du fil est une chape, en acier ou en agate, que l'on pose sur un pivot. Une très-faible action électrique suffit pour mettre l'aiguille en mouvement.

L'électroscope de Coulomb (*fig.* 282) est l'appareil le plus sensible et le plus délicat pour indiquer la présence des forces électriques. On le construit avec un fil de cocon *f*, une aiguille de gomme laque *g g'*, et un petit cercle de clinquant *c*. Le fil est fixé au treuil *t*, qui sert à l'enrouler ou à le dérouler pour élever ou abaisser l'aiguille. Une cage de verre *v v'* préserve l'aiguille des agitations de l'air ; elle porte une circonférence divisée *d d'*, et un couvercle *c c'* percé d'une ouverture *o* : c'est par cette ouverture que l'on fait descendre lentement les corps électrisés qui doivent attirer l'extrémité de l'aiguille pour la faire tourner, à moins toutefois qu'ils ne soient assez puissans pour agir du dehors à travers l'épaisseur du verre.

Au moyen de ces appareils, on peut facilement soumettre à l'épreuve tous les corps, et voir s'ils sont tous capables de prendre de l'électricité par le frottement. L'expérience en est curieuse, par l'extrême variété des résultats qu'elle donne : on trouve en effet que la gomme laque et la résine, l'ambre, le soufre et le verre sont des corps éminemment

électriques ; qu'il en est de même du diamant, de la topaze, de l'émeraude et de la plupart des pierres précieuses ; que la terre cuite, le bois et le charbon donnent rarement des signes d'attraction, même quand ils ont été frottés longtemps et à plusieurs reprises ; enfin, que les métaux, et d'autres corps encore, ne prennent jamais la moindre apparence attractive, quelque soin qu'on apporte à répéter ou à varier les frictions. Voilà donc tous les corps de la nature séparés en deux grandes classes : ceux qui prennent de l'électricité par le frottement, qu'on appelle *idio-électriques ;* et ceux qui n'en prennent pas, que l'on appelle *anélectriques*.

190. *Des corps conducteurs et des corps non conducteurs.* Si les corps anélectriques ne prennent pas d'électricité quand on les frotte, ils peuvent cependant en prendre d'une autre manière. C'est Gray, physicien anglais, qui fit cette découverte en 1727. Gray, après avoir électrisé un tube de verre ouvert par les deux bouts, voulut voir s'il obtiendrait les mêmes résultats en fermant le tube avec un bouchon de liége ; car, à cette époque, la science était encore si peu avancée que l'on essayait de tout au hasard, on n'avait rien pour se conduire, pas même un système. Or, en faisant l'expérience, Gray s'aperçut avec un grand étonnement que le bouchon lui-même était devenu électrique, tandis qu'il ne l'est jamais lorsqu'on le frotte directement. Une tige de métal, plantée dans le bouchon, devint électrique comme lui ; une tige plus longue le devint pareillement, et l'habile observateur ne se lassait pas de répéter des expériences aussi curieuses. Voyant qu'il ne pouvait pas, dans son cabinet, ajuster au bouchon des tiges assez longues, il imagine de monter au premier étage, et de suspendre à son tube électrique un fil de métal qui descend jusqu'au sol ; il frotte le tube, et un de ses amis présente des corps légers à l'extrémité du fil : chose surprenante ! les corps légers y sont vivement attirés. On répète l'expérience au second

et au troisième étage, et toujours avec le même succès. Donc, le métal a la propriété de transmettre l'électricité ; et, puisqu'il la transmet instantanément, il faut que l'électricité soit une espèce de *fluide* qui passe du verre au métal et qui se répande instantanément sur toute sa surface. Cette propriété se manifeste dans tous les corps anélectriques, et on l'exprime en disant que tous ces corps sont *conducteurs* de l'électricité. Au contraire, les corps idio-électriques sont *non conducteurs*, c'est-à-dire que l'électricité ne se répand jamais sur leurs surfaces ; car, en frottant un tube de verre à l'une de ses extrémités seulement, son autre extrémité ne donne aucun signe d'attraction.

Cette vérité fondamentale peut être démontrée avec la *machine électrique*, que nous prendrons seulement comme moyen d'avoir de l'électricité : on fait communiquer avec elle un long fil de métal, soutenu par des fils de *soie* ou par des tubes de *verre*, et, dès qu'on tourne la machine, on reconnaît aisément : 1° qu'il est électrisé dans toute son étendue, quelle que soit sa longueur, et quelles que soient les circonvolutions qu'on lui fasse parcourir ; 2° que, s'il est interrompu quelque part, par du verre ou de la soie, il ne montre plus d'électricité au-delà de cette interruption ; 3° et que, s'il touche *au sol*, il ne donne plus aucun signe électrique, car le sol est assez bon conducteur pour que l'électricité s'y répande, se dissipe au large sur toute sa surface, et de là se communique à l'édifice entier, ou même au globe de la terre.

Il résulte de là que l'air est un corps non conducteur ; car, s'il était conducteur, comme un métal, l'électricité développée par le frottement passerait du corps frotté dans l'air qui l'environne, et se disperserait à l'instant dans toute la masse de l'atmosphère.

L'eau et la vapeur d'eau sont de bons conducteurs : un corps électrisé donne toute son électricité à l'eau dans laquelle on le plonge, ou à la vapeur d'eau bouillante à laquelle

on l'expose. C'est pourquoi l'électricité, qui se conserve long-temps dans l'air sec, se dissipe promptement dans l'atmosphère quand l'air est humide.

Le corps humain est aussi un bon conducteur : quand un homme est debout sur un mauvais conducteur, comme un gâteau de résine, il s'électrise dans toute son étendue, en touchant avec la main des corps électrisés : et, quand il touche au sol, il ne conserve rien de l'électricité qu'il prend au corps ; il la transmet au sol où elle va se perdre. Cette propriété nous explique pourquoi les métaux ne s'électrisent point lorsqu'on les tient à la main nue, puisque leur électricité doit se dissiper à mesure qu'elle se développe.

Les plus mauvais conducteurs deviennent d'assez bons conducteurs lorsqu'on les humecte de quelque vapeur aqueuse : c'est pourquoi il faut chauffer les corps pour les sécher avant de les soumettre au frottement ; alors le moindre contact les électrise, et même la main sèche jouit de cette propriété : en passant, par exemple, un tube de verre, un ruban de soie ou une bande de papier entre les doigts, on leur donne une grande force électrique.

La *conductibilité électrique* des différens corps dépend donc d'une cause permanente, qui est la nature de leur substance ; mais elle dépend aussi de plusieurs causes accidentelles dont il est difficile de mesurer l'influence. Ainsi, au lieu de dire que les corps sont conducteurs ou non conducteurs, il est plus exact de dire qu'ils sont bons conducteurs ou mauvais conducteurs ; car il n'existe pas un corps qui soit non conducteur absolu. Les plus mauvais conducteurs sont la gomme laque, la soie, le verre et les résines ; on les appelle aussi corps *isolans*, parce que les corps électrisés qui reposent sur eux sont véritablement isolés ou séparés du sol, et conservent long-temps l'électricité qu'ils possèdent. Les métaux sont les meilleurs conducteurs que l'on connaisse : nous verrons qu'un fil de métal, de plusieurs lieues de longueur, s'électrise à l'instant dans toute son étendue,

lorsqu'un peu d'électricité est développée ou déposée sur un seul de ses points. Entre les plus mauvais et les meilleurs conducteurs se trouve l'infinie variété des corps de la nature ayant tous des degrés de conductibilité différens.

191. *Des deux espèces d'électricité.*—Un corps électrisé repousse un corps léger auquel il vient de communiquer de son électricité. En effet, prenons un *pendule isolé* (c'est le pendule de la figure 279, dont le support est en verre et dont le fil de suspension est en soie) : dès que nous approchons un tube électrisé, la balle de sureau est fortement *attirée*, mais vient-elle toucher le tube et se coller à lui pendant quelques instans, aussitôt elle est *repoussée*, et repoussée à distance comme elle était attirée d'abord. Cette répulsion de la balle est produite par l'électricité qu'elle a prise au tube ; car, en la touchant avec la main pour la remettre à l'état naturel, elle est *attirée* de nouveau, et de nouveau *repoussée* dès qu'elle est venue au contact ; et ce qui en est une preuve encore plus frappante, c'est qu'alors elle attire les corps naturels, ou plutôt elle est attirée par eux, parce qu'elle est plus mobile. Cette expérience peut être faite avec l'électroscope de Coulomb, ou avec *l'aiguille isolée* (on appelle ainsi l'aiguille de la figure 280, lorsqu'elle est posée sur une plaque de substance non conductrice, ou bien lorsqu'elle est simplement portée sur son pivot par une chape isolante par exemple, une chape de verre ou d'agate. On peut aussi la varier d'une autre manière, avec une feuille d'or qui flotte dans l'air. Dans tous les cas, chaque corps électrique, quel qu'il soit, repousse toujours le corps léger qu'il vient de toucher.

Mais si l'on prend deux pendules isolés (*fig.* 284), l'un qui soit électrisé par le verre et repoussé par lui, l'autre électrisé par la résine et pareillement repoussé par elle, on observe ce phénomène remarquable : que le verre attire puissamment le pendule qui a été électrisé par la résine, et *vice versâ* ; que la résine attire aussi très-vivement le pendule qui a été élec-

trisé par le verre ; on peut même constater que les pendules s'attirent l'un l'autre, tandis que deux pendules touchés avec le même corps électrique se repoussent mutuellement (*fig.* 283). Donc, l'électricité du verre et celle de la résine ne sont pas identiques, puisque chacune attire ce qui est repoussé par l'autre.

Ces deux électricités, différentes dans leur origine et dans leurs effets, doivent porter aussi des noms différens : la première est appelée *électricité vitrée*, et la seconde *électricité résineuse*.

Ainsi, nous sommes conduits à cette conséquence importante : qu'il y a deux électricités telles que chacune se repousse et attire l'autre.

Sans avoir éprouvé les autres corps, nous pouvons être assurés d'avance que leur électricité est résineuse ou vitrée, car, s'ils agissent sur un pendule électrisé, il faut bien qu'ils le repoussent ou qu'ils l'attirent : c'est, au reste, ce qu'il est facile de vérifier sur tous les corps. Cette belle découverte des deux électricités a été faite par Dufay, physicien français, en 1733. (*Mém. de l'Académie des Sciences*, 1733.)

Quelques Physiciens donnent à l'électricité vitrée le nom d'*électricité positive*, et à l'électricité résineuse celui d'*électricité négative*. Il nous arrivera souvent d'employer ces dénominations, bien qu'elles tiennent à un système où l'on essaie d'expliquer tous les phénomènes par une seule électricité, qui serait tantôt *en excès* ou *en plus*, tantôt *en défaut* ou *en moins*.

192. *Des fluides électriques et de l'état naturel des corps.* — De la rapidité avec laquelle l'électricité se répand sur toute l'étendue des corps conducteurs on conclut qu'elle est un fluide excessivement mobile, et de l'opposition qui existe entre les électricités du verre et de la résine on conclut que ce fluide est double, c'est-à-dire qu'il y a deux fluides électriques, comme il y a deux fluides magnétiques. Ces deux fluides, *combinés* entre eux par leur attraction

mutuelle, ou *neutralisés* l'un par l'autre, constituent *l'état naturel* des corps ; mais, viennent-ils à être *décomposés* ou *séparés* par une cause quelconque, les actions contraires qu'ils exercent au dehors ne peuvent plus se compenser exactement, et le corps dans lequel cette *décomposition* a eu lieu est un corps électrisé : il est *électrisé vitreusement* si c'est le fluide vitré qui domine, et *résineusement* si c'est le fluide résineux. Quant au mode d'existence du fluide électrique dans l'intérieur des corps, tous les phénomènes semblent indiquer qu'il est répandu dans les intervalles qui séparent les atomes pondérables, et que là il peut être, de proche en proche, décomposé et recomposé, suivant les forces qui le sollicitent. Il y a toutefois une différence fondamentale entre le fluide électrique et le fluide magnétique : celui-ci est enfermé dans les élémens magnétiques, il peut s'y mouvoir, mais il n'en peut sortir ; tandis que le fluide électrique est libre dans tous les corps, il peut traverser dans tous les sens toute l'étendue de leur masse, et même il peut en sortir pour se répandre et s'accumuler sur les corps voisins. Cette vérité résulte évidemment de toutes les expériences que nous avons déjà rapportées, et nous la verrons confirmée par l'ensemble des phénomènes électriques.

Lorsque nous développons de l'électricité résineuse ou vitrée dans un corps qui était d'abord à l'état naturel, il faut donc que l'électricité contraire se trouve pareillement développée, ou bien qu'elle soit détruite par la cause décomposante. Or, la destruction d'un agent naturel ou d'une force n'étant pas moins impossible que la destruction de la matière elle-même, nous pouvons être assurés que jamais l'une de ces électricités n'est développée sans l'autre. C'est au reste ce que l'on peut vérifier par l'expérience, en frottant l'un contre l'autre deux disques isolés par des manches de verre (*fig.* 285) : lorsque après le frottement on les tient unis, ils ne donnent aucun signe électrique, mais dès qu'on les sépare, il est facile de reconnaître que l'un possède l'élec-

tricité vitrée, et l'autre la résineuse. Ces disques peuvent être en verre, en résine, en bois ou en métal, et, si l'on veut donner plus de variété à l'expérience, on y colle des fourrures, des étoffes, du papier, etc., car l'espèce d'électricité ne dépend que des surfaces frottantes.

Un corps naturel possédant les deux électricités en égale proportion, il semble d'abord qu'il n'y ait pas de raison pour qu'il prenne ou qu'il conserve l'un des fluides de préférence à l'autre; aussi est-il susceptible de devenir, par le frottement, tantôt résineux et tantôt vitré : par exemple, le verre est vitré quand on le frotte avec la laine ou la soie, et il est résineux quand on le frotte avec une peau de chat, une peau de loutre, et plusieurs autres fourrures. Il y a pareillement des corps qui font prendre à la résine l'électricité vitrée, tandis que beaucoup d'autres lui font prendre la résineuse. Pour définir rigoureusement chacun des fluides, il convient donc d'ajouter que le fluide vitré est produit par le verre frotté avec la laine, et le résineux produit par la résine frottée avec la peau de chat, la laine ou la soie.

Concevons que l'on dresse une liste de tous les corps, en les rangeant par ordre de *tendances électriques*, de telle sorte que chacun soit vitré avec les suivans, et résineux avec les précédens; alors on pourra reconnaître que des circonstances presque imperceptibles feront changer la place d'un corps dans cette liste : par exemple, une élévation de température le prédisposera à prendre l'électricité résineuse et le fera redescendre de plusieurs rangs, tandis que le refroidissement le fera remonter, en le rendant plus vitré; une surface plus polie le fera pareillement remonter, tandis qu'une surface plus rugueuse le fera redescendre. C'est ce qu'il est facile de vérifier sur un tube de verre dépoli. La couleur, la disposition des molécules ou des fibres, le sens de la friction, et même la pression plus ou moins forte du corps frottant, pourront produire des résultats analogues : par exemple, un ruban de soie noire prend toujours l'électricité résineuse

quand on le frotte avec un ruban blanc, et des rubans de la même pièce, étant frottés en croix, celui qui est immobile prend l'électricité vitrée et l'autre la résineuse. Il y a même des substances comme le *disthène*, qui, sur certaines parties de leur surface, prennent l'électricité vitrée, et la résineuse sur d'autres, sans qu'on puisse y reconnaître la moindre différence de température ou d'aspect. On peut varier indéfiniment ces expériences, avec des rubans de laine ou de soie, des bandes de papier, des pièces de fourrure et des corps conducteurs, que l'on isole très-bien en les supportant par des tuyaux de plume.

193. *De la communication de l'électricité.* — L'électricité se communique au contact et à distance, mais toujours son mode de communication dépend de la conductibilité des corps et de l'étendue de leur surface.

Au contact, les corps très-mauvais conducteurs ne prennent ou ne perdent de l'électricité que dans l'étendue des surfaces touchées; les très-bons conducteurs la prennent ou la perdent dans toute l'étendue de leur surface; et les corps intermédiaires, pour leur conductibilité, présentent des résultats intermédiaires, et prennent ou perdent l'électricité autour des points de contact, dans une étendue d'autant plus grande qu'ils sont meilleurs conducteurs.

L'électricité qui se communique *à distance* se répand aussi sur les corps à raison de leur conductibilité, mais à son passage elle présente le phénomène curieux de *l'étincelle électrique*. Il n'est pas nécessaire qu'un tube soit très-fortement électrisé pour qu'on voie, à la distance de plus d'un pouce, briller une vive étincelle quand on en approche une tige de métal ou même la jointure du doigt; en même temps on entend un bruit sec, qui semble jaillir avec l'étincelle: nous verrons plus tard la cause du bruit et celle de la lumière. Quand le corps électrisé est métallique, et qu'il offre une grande surface, comme les conducteurs de la machine, l'étincelle part à plus d'un pied de distance, sa lumière prend

un éclat éblouissant, et le bruit qui l'accompagne frappe l'air comme un coup de fouet.

C'est Otto de Guericke, l'inventeur de la machine pneumatique, qui vit le premier l'étincelle électrique; et plus tard, Dufay, dont nous venons de parler, excita une grande admiration en démontrant que du corps d'un homme on peut faire jaillir des étincelles et des lames de feu, comme des conducteurs de la machine.

Pour en faire l'expérience, il faut monter sur un gâteau de résine bien sec, ou sur un isoloir ayant des pieds de verre, et communiquer avec la machine, soit en la touchant avec la main, soit en la touchant avec une tige ou une chaîne de métal : la personne qui se trouve dans cette position ne reçoit aucun choc lorsqu'on tourne la machine pour développer de l'électricité; seulement, elle éprouve sur la peau, et surtout à la figure, l'impression d'un souffle léger; ses cheveux se hérissent et laissent échapper des aigrettes de lumières. Alors, si on approche d'elle la jointure du doigt, ou quelque corps conducteur, on en tire de longues étincelles, et l'on éprouve soi-même une *commotion électrique* qui n'a rien de dangereux. Si l'étincelle ne part qu'à la distance d'un pouce, on ne sent qu'une légère piqûre; si elle part à deux ou trois pouces, la sensation se fait sentir jusqu'au coude, et tout l'avant-bras se fléchit d'un mouvement involontaire et irrésistible; l'étincelle qui part à une distance plus grande, comme à six ou huit pouces, se fait sentir jusqu'à la poitrine, et produit un ébranlement dans tout le corps. Alors on est averti qu'il n'est pas prudent de recevoir des étincelles plus fortes. Pendant ce temps-là, la personne isolée qui communique à la machine ressent à-peu-près les mêmes secousses que la personne qui l'approche pour en tirer des étincelles.

Soit que le partage de l'électricité se fasse au contact ou à distance, entre des corps bons conducteurs, il se fait toujours en raison des surfaces. Ainsi, pour qu'un

corps électrisé donne toute son électricité, il faut se mettre en communication avec une très-grande surface, par exemple, avec les murs ou le plancher de l'appartement, car les murs communiquent eux-mêmes avec le *sol* ou la *surface de la terre*, que l'on appelle le *réservoir commun*. En effet, une boule de cuivre, isolée à l'extrémité d'un manche de verre, ne tire des conducteurs de la machine que de très-faibles étincelles ; tandis qu'elle tire les plus fortes étincelles, et décharge complètement les conducteurs, lorsqu'elle communique au sol par une chaîne conductrice (*figure* 310).

De ce qu'on n'est pas brûlé par la lumière électrique, il n'en résulte pas que ce soit une lumière sans chaleur : en effet, nous verrons par les expériences suivantes que, dans beaucoup de cas, l'électricité agit comme le feu, et qu'elle devient souvent un agent chimique des plus puissans.

Une bougie qui vient d'être éteinte se rallume à l'instant lorsqu'on tire une étincelle à travers la mèche encore chaude.

L'étincelle peut enflammer l'éther et même l'alcool ; ces liquides sont dans un petit vase de métal, que l'on approche d'un corps électrisé, de manière que l'étincelle parte à la surface du liquide : le corps électrisé peut être une personne isolée communiquant avec la machine.

Le pistolet de Volta est représenté (*fig.* 286) : c'est un petit vase de métal qui se ferme par un bouchon de liége ; un fil de cuivre terminé par deux petites boules *b*, *b'* passe du dedans au dehors sans toucher les parois, et, pour cela, on le mastique avec de la cire dans un tube de verre *tt'*; l'étincelle qui entre par ce fil doit passer de la boule *b'* à la paroi opposée, en traversant le gaz qui remplit le pistolet. Si ce gaz est détonant, s'il est par exemple un mélange d'hydrogène et d'air, ou mieux encore d'hydrogène et d'oxigène, dans les proportions qui font l'eau, l'étincelle détermine l'action chimique, la détonation a lieu, le bouchon est lancé au loin, et de l'eau est formée.

CHAPITRE II.

De l'Électricité par influence.

194. *Un corps électrisé décompose à distance les électricités naturelles de tous les corps conducteurs.* — Nous venons de voir que chacun des fluides électriques attire le fluide de noms contraires, et repousse celui de même nom ; ces attractions et répulsions n'ont pas lieu seulement sur les fluides libres et déjà décomposés, mais elles s'exercent aussi sur les fluides combinés ; et il résulte de là qu'un corps conducteur peut, *sans rien perdre et sans rien recevoir*, être constitué dans un état électrique particulier qui naît de la cause agissante à laquelle il est soumis et qui cesse avec elle. C'est cette électricité produite à distance que l'on appelle *électricité par influence.*

Par exemple, un anneau de cuivre *nn'* (*fig.* 287), portant deux fils de métal très-fins et deux balles de sureau, est soutenu sur un tube ou sur un crochet de verre ; on le présente à un corps *r*, électrisé résineusement, et, à la distance de plus d'un pied, on voit les deux balles qui s'écartent l'une de l'autre pour prendre la position *bb'* ; à une distance plus petite, la divergence est plus grande, sans que l'étincelle jaillisse entre l'anneau et le corps électrisé. Les balles *bb'* sont donc chargées d'une même électricité, et même il est facile de reconnaître que cette électricité est résineuse, comme celle du corps *r* qui agit sur l'anneau et sur elles. Cependant, il n'en faudrait pas conclure qu'il y a une communication électrique au travers de l'air : car, en éloignant l'anneau, soit lentement soit rapidement, la divergence diminue à mesure que la distance augmente, et elle devient tout-à-fait nulle quand la distance est assez grande ; ce qui n'arriverait

pas si les balles ou l'anneau avaient reçu du corps r une électricité quelconque. Tout le phénomène se passe donc dans les balles et l'anneau, et dans les fils de métal qui les joignent. Ce système de corps conducteurs a ses fluides naturels décomposés par l'influence du corps électrisé ; tout le fluide vitré qui résulte de cette décomposition se rassemble dans l'anneau, où il est appelé par l'attraction de r, et tout le fluide résineux est refoulé dans les balles par la répulsion. Ainsi, ces deux fluides sont simplement *déplacés*, dans le système conducteur; ils se rejoignent par leur attraction mutuelle, et se recomposent dès que la distance du corps électrisé est trop grande pour les maintenir séparés.

Pour ne laisser aucun doute sur cette vérité fondamentale, il suffit de venir toucher l'anneau avec un petit *plan d'épreuve* (1), que l'on retire à l'instant; et de montrer qu'en effet ce plan d'épreuve est chargé d'électricité vitrée, tandis que les balles divergent par l'électricité résineuse. On dit quelquefois qu'un corps est *dans la sphère d'activité* ou *hors de la sphère d'activité* d'un corps électrisé, suivant qu'il en ressent ou n'en ressent pas l'influence: mais il faut remarquer que ces expressions, dont on peut se servir sans inconvénient, sont bien moins relatives au corps électrisé lui-même qu'au corps que l'on soumet à son influence: rigoureusement, la sphère d'activité d'un corps électrisé s'étend à l'infini, et la distance à laquelle nous pouvons rendre ses effets sensibles dépend de la mobilité des appareils que nous employons.

On peut encore disposer l'expérience de la manière suivante: cc' (*fig.* 288) est un *excitateur* (on nomme ainsi une tige de cuivre terminée comme le représente la figure; le plus souvent elle peut se tirer et s'allonger comme une lunette); on suspend à chacune de ses extrémités un double pendule à

(1) *Le plan d'épreuve* est un petit disque de clinquant ou du papier doré, de quelques lignes de diamètre, qui est collé par son bord ou par son centre à une longue aiguille de gomme laque.

fil de lin ou de métal, et on le place sur un isoloir *s*; alors on approche un corps électrisé *r*, et l'on observe une divergence dans les balles. Si le corps est électrisé résineusement, comme le représente la figure, l'électricité vitrée se porte et s'accumule dans la partie de l'excitateur qui en est la plus voisine, et la résineuse est refoulée à l'extrémité opposée; c'est ce qu'on peut vérifier en approchant un tube de verre électrisé ou un bâton de résine, ou en prenant de l'électricité avec le plan d'épreuve pour en reconnaître la nature. Le contraire arriverait si le corps *r* était électrisé vitreusement.

Un corps électrisé par influence agit, à son tour, pour électriser les corps voisins qui se trouvent dans sa sphère d'activité, et ces actions successives peuvent se propager jusqu'à de grandes distances. Il suffit de jeter les yeux sur la *figure* 66 pour voir la disposition que l'on peut donner aux appareils dans ces expériences.

m est un conducteur de la machine,

c un premier cylindre isolé,

c' un second cylindre pareil,

b une boule de cuivre,

et *b'* une petite balle de sureau.

La divergence des balles indique la présence de l'électricité, et les signes + et — marquent son espèce.

Lorsqu'un corps conducteur est déjà chargé d'électricité, il n'en éprouve pas moins l'influence d'un autre corps électrisé; une seule expérience suffit pour montrer combien de phénomènes curieux peuvent résulter de ce principe. Le petit anneau à pendules, de la première des expériences qui précèdent, est électrisé résineusement: on lui présente un corps électrisé résineusement comme lui, et la divergence des balles augmente donc, son électricité résineuse est repoussée et refoulée dans les balles par l'électricité résineuse qui agit sur lui par influence, ou, si l'on veut, ses électricités naturelles sont séparées: la résineuse est refoulée

dans les balles, où elle s'ajoute à la résineuse qui s'y trouve déjà; tandis que la vitrée est appelée dans l'anneau, où elle neutralise une égale portion de résineuse en se recomposant avec elle. La charge primitive de l'anneau et celle du corps qu'on lui présente peuvent être telles que, pendant l'action par influence, l'anneau se trouve encore électrisé résineusement, ou qu'il reprenne son état naturel, ou même qu'il se montre avec une charge d'électricité vitrée. C'est ce que l'on peut vérifier avec le plan d'épreuve.

Ces phénomènes sont plus apparens lorsqu'on donne à l'anneau une charge primitive d'électricité vitrée : alors, sous l'influence des corps résineux, qu'on en approche graduellement, les balles se rapprochent peu-à-peu, reviennent au contact, et divergent de nouveau; ce qui prouve d'une manière évidente que leur électricité vitrée a été peu-à-peu appelée dans l'anneau, qu'elle y est venue en totalité, et qu'enfin, pour une moindre distance du corps agissant, il s'est fait une décomposition nouvelle qui refoule du fluide résineux dans les balles et qui leur donne une nouvelle divergence.

195. *Les corps électrisés par influence retombent à leur état primitif dès que l'influence cesse.*—Puisque la décomposition par influence est instantanée dans les corps conducteurs, la recomposition doit être instantanée dès qu'on détruit la cause décomposante.

Or, on peut en général la détruire de deux manières : soit graduellement, en tirant des corps électrisés de petites étincelles avec un corps isolé, ou en augmentant la distance du corps conducteur qui reçoit son influence; soit subitement, en tirant du corps électrisé une étincelle totale qui le décharge complètement lorsqu'il est lui-même conducteur.

Dans le premier cas, la recomposition est graduelle comme la diminution de la force, et l'on s'en aperçoit à la divergence des balles, qui diminue de plus en plus. Dans le second cas, les deux électricités séparées par influence se rejoignent

par leur attraction mutuelle, et se recomposent en totalité, comme on le voit par le rapprochement des balles, qui est subit et complet.

Dans ces phénomènes, ni l'un ni l'autre des fluides ne sort de la masse qui reçoit l'influence électrique, mais ils éprouvent tous deux un mouvement de translation dans l'étendue de cette masse, soit quand ils se séparent, soit quand ils se rejoignent; et ces mouvemens rapides de l'électricité produisent dans les molécules pondérables des secousses mécaniques ou des effets chimiques très-remarquables.

Par exemple une grenouille, préparée et disposée comme on le voit dans la figure 289, semble n'éprouver aucun effet lorsqu'on tourne lentement la machine qui charge d'électricité vitrée le conducteur *c* : cependant, son électricité naturelle est décomposée par influence, la résineuse est appelée en *r*, tandis que la vitrée est repoussée dans le sol par le fil *s*, et, dès qu'on tire une étincelle au conducteur, la recomposition subite des électricités de la grenouille imprime à tout son corps une sorte de convulsion qui la fait sauter comme si elle s'élançait par un mouvement volontaire; preuve frappante que, dans le retour à l'état naturel, les molécules des corps sont agitées par les fluides qui se pressent pour se rejoindre. Les commotions de cette espèce s'appellent *le choc en retour*. L'expérience serait tentée sans succès sur une grenouille tuée depuis cinq ou six heures : mais elle réussit très-bien avec une grenouille qui vient d'être coupée et dépouillée, et mieux encore avec une grenouille vivante telle qu'elle sort de l'eau.

En présence d'une puissante machine, un homme qui communique au sol éprouve des secousses analogues, on en peut faire l'expérience avec un conducteur d'une grande superficie : deux personnes placées aux deux extrémités de ce conducteur n'éprouvent pas d'effets sensibles pendant qu'il se charge, mais, l'une d'elles s'approchant assez près pour tirer des étincelles, l'autre éprouve, à l'instant, toute

la violence du choc en retour, sans qu'il paraisse aucune trace d'électricité ni de lumière entre elle et le conducteur.

En étudiant les effets de la foudre, nous verrons qu'un nuage orageux peut agir d'une manière analogue, et foudroyer à la fois par le *choc direct* et par le *choc en retour*.

Quand le corps conducteur qui reçoit l'influence électrique n'est pas en communication directe avec le sol, il se peut faire qu'il perde peu-à-peu celle des électricités qui est repoussée, et qu'ensuite, la cause décomposante étant subitement détruite, il perde tout-à-coup, par une seule étincelle, l'autre électricité qui s'est accumulée sur sa surface. C'est ce que l'on vérifie avec un pistolet de Volta disposé en présence des conducteurs de la machine.

196. *En touchant les corps conducteurs, lorsqu'ils sont soumis à l'influence, on en peut tirer l'une ou l'autre électricité : mais on ne peut les charger que d'une seule électricité, en les mettant en communication avec le sol.* — Reprenons l'un des cylindres isolés de la figure 290, et supposons que ses électricités naturelles soient décomposées par l'influence de la machine : son fluide résineux étant appelé en r, son fluide vitré repoussé en v, et la *ligne neutre* $n\,n'$ marquant sur sa surface les points qui séparent les deux fluides contraires. Dans cet état, si on vient le toucher avec un plan d'épreuve, on prendra de l'électricité résineuse dans la région $n\,r$; de la vitrée dans la région $n\,v$, et l'on ne prendrait point d'électricité sensible sur la ligne neutre $n\,n'$. Mais si, au lieu de toucher le cylindre avec un plan d'épreuve très-petit, on vient le mettre en communication avec le sol, on obtiendra des résultats tout-à-fait différens : s'il communique au sol par un point de la région nv, tout le fluide vitré s'écoule, et le fluide résineux reste en totalité maintenu par l'attraction du fluide vitré de la machine ; s'il communique au sol par un point de la région nr, c'est *encore le fluide vitré* qui s'écoule, et le fluide résineux qui reste.

Ce phénomène remarquable, très-facile à vérifier, est aussi

très-facile à expliquer : car le fil de métal qui établit la communication avec le sol éprouve lui-même la décomposition par influence ; son fluide vitré est refoulé dans le sol, tandis que son fluide résineux est attiré, passe sur le cylindre, et neutralise, en s'y répandant, tout le vitré qui s'y trouve ; le résultat est le même que si le cylindre avait été en communication avec le sol avant d'éprouver l'influence des conducteurs de la machine.

Or, si, en touchant la région *nr* avec le plan d'épreuve, qui est très-petit, on en tire de l'électricité résineuse, et si, en la touchant avec le sol, qui est très-grand, on en tire de la vitrée, il faut bien qu'il existe des corps isolés, d'une certaine dimension, qui n'en pourraient tirer ni l'un ni l'autre des fluides.

Cette conséquence est importante, et nous ne la présentons ici que pour indiquer d'avance que, dans la décomposition par influence, le lieu et la forme de la ligne neutre dépendent d'une foule de conditions, et que, dans le contact des corps électrisés, il se produit des phénomènes très-complexes.

197. *Électroscopes.* — Nous avons déjà fait connaître le pendule électrique, l'aiguille électrique et l'électroscope de Coulomb ; mais on a été conduit, par les phénomènes de l'électricité par influence, à construire d'autres électroscopes qui conservent mieux l'électricité qu'on leur donne, et qui sont plus propres à donner approximativement une idée des forces électriques qui les sollicitent. Tous ces appareils se composent essentiellement d'un *vase de verre,* d'un *conducteur fixe,* et d'un *conducteur mobile.*

Le *vase de verre* a la forme d'une cloche ou d'un flacon : l'orifice supérieur est étroit ; et le fond peut être de verre (*fig.* 292), mais le plus souvent il est en métal (*fig.* 291), et alors il porte deux boules de cuivre, ou bien il communique à deux petites lames d'étain *e e'* qui sont collées verticalement sur les parois intérieures de la cloche.

Le *conducteur fixe* est une petite lame métallique qui se termine en haut par une boule (*fig.* 291) ou par un anneau (*fig.* 292) ; elle est mastiquée avec de la gomme laque dans le col du vase, et même, pour plus de précaution, la surface extérieure du verre est vernie jusqu'à une distance *v v'*.

Le *conducteur mobile* est suspendu à l'extrémité inférieure du conducteur fixe, c'est de sa nature que dépend le nom de l'électroscope : dans *l'électroscope à pailles*, il se compose de deux pailles légères que l'on suspend au conducteur fixe par de petits anneaux de fil de métal très-fin ; dans *l'électroscope à lames d'or*, il se compose de deux lames d'or qui se collent, par simple apposition, sur l'extrémité aplatie du conducteur fixe (*fig.* 292) ; dans *l'électroscope à balles de sureau*, il se compose de deux fils de métal très-fins, qui s'attachent comme les pailles et qui portent à leur extrémité inférieure des petites balles de sureau *bb'* (*fig.* 291). Ces conducteurs mobiles viennent, dans leur plus grande divergence, toucher les boules ou les lames d'étain pour se décharger de leur électricité ; car, s'ils allaient toucher la surface du verre, ils y resteraient adhérens et lui communiqueraient une électricité qui pourrait pendant long-temps troubler les résultats.

Les expériences dont nous avons parlé précédemment suffisent pour indiquer l'usage des électroscopes.

Lorsqu'on voudra simplement reconnaître la présence de l'électricité dans un corps, il faudra l'approcher graduellement du conducteur fixe de l'électroscope, et observer la divergence toujours croissante des conducteurs mobiles. De deux corps de même forme, placés à la même distance, celui qui produira la moindre divergence aura évidemment la moindre force électrique ; mais les intensités ne seront pas proportionnelles aux angles d'écart, elles suivent une loi beaucoup plus compliquée.

Lorsqu'on voudra reconnaître l'espèce d'électricité que possède un corps, il faudra préalablement donner à l'élec-

troscope une électricité connue ; ce qui se fait de la manière suivante. On approche un corps électrique, et en même temps on touche avec le doigt le bouton de l'électroscope : le fluide *repoussé* passe dans le sol, et, en retirant *d'abord* le doigt et *ensuite* le corps électrisé, l'électroscope reste chargé du fluide *attiré,* c'est-à-dire du fluide contraire à celui du corps qu'on lui présente. Dans cet état, tout corps qu'on en approche, et qui augmente sa divergence, est certainement chargé de la même électricité que l'électroscope, mais l'inverse n'a pas lieu ; tout corps qui diminue la divergence n'est pas nécessairement chargé d'une électricité contraire à celle de l'électroscope, car les corps conducteurs, pris dans leur état naturel, doivent eux-mêmes produire cet effet sur les conducteurs mobiles, à cause de la décomposition par influence qu'ils éprouvent.

Ainsi, l'augmentation de divergence est une épreuve décisive: tandis que la diminution est une épreuve incertaine, à moins toutefois que cette diminution ne soit très-grande, et que le corps qui la produit, étant approché davantage, ne soit capable de déterminer une divergence contraire après avoir ramené jusqu'au contact les conducteurs mobiles de l'électroscope.

Quand l'air est humide, l'électricité se perd promptement, et il serait impossible alors de faire des expériences comparatives avec les électroscopes si l'on n'avait soin de dessécher l'air qu'ils contiennent avec quelques fragmens de muriate de chaux; et même il est bon de dessécher aussi l'air qui les environne, en les enveloppant d'une cage au fond de laquelle on place des corps propres à absorber l'humidité.

198. *Electrophore.* — Cet instrument, imaginé par Volta, repose encore sur les principes de l'électricité par influence : il se compose d'un *gâteau* de résine *g* (*fig.* 293), d'un *plateau p* auquel est adapté un manche isolant *m*. La résine est coulée dans un moule de bois ou de métal, il importe que sa surface supérieure soit sensiblement plane; le pla-

teau est de cuivre avec un rebord arrondi, ou simplement de bois revêtu d'étain; son diamètre est moindre d'un ou deux pouces que celui du gâteau. Après avoir électrisé toute la surface de la résine en la battant avec une peau de chat, on pose sur elle le plateau par son manche isolant, et avec le doigt on en tire une étincelle : c'est son électricité résineuse qui s'écoule dans le sol. Ensuite, en relevant le plateau, on le trouve fortement chargé d'électricité vitrée. On peut répéter l'expérience plusieurs centaines de fois de suite sans qu'il soit nécessaire de donner au gâteau une nouvelle charge avec la peau de chat. L'électricité de la résine, agissant par influence sur les électricités naturelles du plateau, à travers la mince couche d'air qui l'en sépare, y produit une grande décomposition, et l'électricité vitrée qu'elle attire ne peut pas venir la neutraliser, parce qu'elle ne peut pas s'accumuler sur un point pour vaincre la résistance de l'air. L'électrophore vaut à lui seul une machine électrique.

199. *Machines électriques.* — Les machines électriques se composent d'un corps frottant, d'un corps frotté, et d'un conducteur isolé.

Le corps frottant est un coussin élastique rembourré de crin; sa face frottante est un cuir enduit d'*amalgame* ou d'*or massif* (deuto-sulfure d'étain).

Le corps frotté est un cylindre ou un plateau de verre.

Le conducteur isolé est en général un système de cylindres creux, de laiton, terminés par des surfaces sphériques ou arrondies, et supportés par des colonnes de cristal vernies à la gomme laque.

Nous allons indiquer les diverses dispositions les plus usuelles.

Machine ordinaire (*fig.* 307). — Le plateau de verre *a*, dont le diamètre peut varier de 20 à 60 pouces, est percé en son centre d'un trou dans lequel passe l'axe à manivelle *b*. Les écrous *c* servent à fixer très-solidement le plateau sur son axe. Les montans *d* (*fig.* 308) sont disposés pour sup-

porter à la fois le plateau et les deux paires de coussins *c* et *c'* qui le frottent de chaque côté, depuis la circonférence jusque au tiers ou à la moitié du rayon (*fig.* 307). Le conducteur *f g f'* (*même fig.*), isolé sur les colonnes *h*, se termine par deux *mâchoires i* qui embrassent le bord du plateau aux extrémités de son diamètre horizontal.

Pour mettre la machine en activité, on sèche les colonnes *h* et le plateau *a* avec des réchauds, ou en les frottant avec du papier sans colle, sec et très-chaud ; on sèche les coussins en les présentant au feu, on les frotte l'un contre l'autre après les avoir enduits d'or massif, on les remet en place, et on y adapte les armatures en taffetas *k* (*fig.* 309); on fait ensuite communiquer les coussins au sol au moyen d'une chaîne, et il n'y a plus qu'à tourner la manivelle *m* pour que les conducteurs se chargent d'électricité.

En effet, l'électricité vitrée que le frottement développe par le plateau agit pour décomposer par influence les électricités naturelles du conducteur et surtout celle des mâchoires *i*; elle repousse la vitrée qui se répand sur toute la surface des conducteurs, et attire la résineuse qui passe des mâchoires au plateau pour le remettre à l'état naturel, ou du moins pour neutraliser d'une manière plus ou moins complète l'électricité vitrée dont il est chargé.

L'électricité résineuse du coussin s'écoule dans le sol, et il est nécessaire qu'elle s'y écoule librement, car, si les coussins étaient chargés d'électricité résineuse, ils développeraient moins d'électricité vitrée sur le plateau.

On emploie quelquefois des *conducteurs secondaires* qui sont des cylindres de cuivre ou de fer-blanc, suspendus au plafond avec des cordes de soie : en mettant ces conducteurs en communication avec ceux de la machine, c'est le système entier qui se charge d'électricité, et l'on peut alors en tirer des étincelles plus fortes.

Machine de Van-Marum. — Cette machine, représentée dans la figure 310, diffère de la machine précédente en ce

qu'elle est disposée pour recueillir à volonté l'électricité résineuse ou la vitrée, c'est-à-dire l'électricité des coussins ou celle du plateau. Les deux paires de coussins sont alors disposées sur un diamètre horizontal et portées par les demi-globes en laiton z et z', et il y a deux arcs mobiles, x, x' et y, y', qui doivent toujours être dans des plans perpendiculaires. Quand l'arc x, x' est vertical, y, y' est horizontal; il communique aux coussins et fait passer leur électricité dans le sol, tandis que l'arc x, x' et le globe g se chargent d'électricité vitrée : au contraire, quand x, x' est horizontal, y, y' est vertical; il communique au plateau et le remet à l'état naturel, tandis que x, x' recueille l'électricité des coussins qui se répand alors sur le globe g et sur les demi-globes z, z'.

Machine de Nairne. — Cette machine, représentée dans la figure 311, est disposée aussi pour donner les deux électricités; mais elle les donne simultanément, sur deux conducteurs différens, v et r : ici, le corps frotté est un grand cylindre de verre a, mobile autour d'un axe horizontal b, et frotté dans le sens de sa longueur par un seul coussin e; on peut y adapter aussi une armature, c'est-à-dire une pièce de taffetas gommé qui empêche le contact de l'air, toujours plus ou moins humide, du lieu où se trouve la machine.

200. *Expériences diverses.* — Devant le conducteur c de la machine est un timbre t communiquant au sol, et un pendule isolé (*fig.* 294); le conducteur électrisé vitreusement attire d'abord le pendule, le charge d'électricité vitrée, et ensuite le repousse : le timbre, au contraire, étant, par l'influence du conducteur, électrisé résineusement dans sa partie antérieure, attire le pendule quand le conducteur le repousse, le décharge de son électricité vitrée, pour lui en donner de la résineuse, et le repousse vers le conducteur, qui l'attire à son tour. De là les oscillations rapides du pendule, qui se continuent aussi long-temps que l'on tourne la machine pour électriser le conducteur.

Au lieu du timbre on peut prendre une boule de métal,

et au lieu du pendule une *araignée* faite avec du liége un peu brûlé à sa surface et suspendue à un fil de soie ; à cause de l'imparfaite conductibilité du liége, les pates de l'araignée semblent s'attacher pendant quelques instans aux corps électrisés qu'elles touchent (*fig.* 296).

Une feuille d'or battu, placée sur un petit plateau de métal communiquant au sol, et à quelques pouces au-dessous du conducteur de la machine, est alternativement attirée et repoussée, et exécute ainsi une série d'oscillations analogues à celles du pendule : c'est de cette manière que l'on fait la danse des pantins, en disposant de petits bonshommes de liége diversement ornés entre deux plateaux de métal, distans de cinq ou six pouces, dont l'un communique au sol, et l'autre au conducteur de la machine.

Ces expériences, qui ne semblent que des jeux d'enfans, ont suggéré à Volta une ingénieuse idée pour expliquer le phénomène de la grêle. Nous reviendrons sur ce sujet dans la Météorologie; mais nous pouvons dès à présent indiquer l'expérience par laquelle Volta imite les divers mouvemens que les grêlons exécutent entre les nuages, avant de tomber en masse sur la terre : *c* (*fig.* 296) est une grande cloche en verre, dont le fond est de métal et communique au sol ; le plateau supérieur *p* communique à la machine, et, dès que l'électricité se fait sentir, les balles de sureau qui étaient tranquilles sur le fond s'élèvent, le touchent, retombent et s'élèvent de nouveau; pendant qu'elles exécutent ces mouvemens alternatifs, elle se heurtent de mille manières, et donnent une idée de cette espèce de cliquetis ou de bruissement que l'on entend dans les nuages quelques instans avant la chute de la grêle.

CHAPITRE III.

Des forces électriques.

201. *Les attractions et les répulsions électriques sont en raison composée des quantités de fluide, et en raison inverse du carré des distances.* — Cette loi fondamentale des actions électriques a été découverte par Coulomb, comme la loi fondamentale des actions magnétiques, et c'est par des moyens analogues, savoir: par la balance de torsion, et par les oscillations d'une petite aiguille, qu'il est parvenu à en démontrer la vérité. La balance électrique diffère peu de la balance magnétique: dans la construction de cette dernière, il faut éviter soigneusement l'emploi des corps ferrugineux; dans la construction de la première, il faut éviter avec le même soin l'emploi des corps conducteurs. On la construit de la manière suivante: sur une table en bois très-sec, on établit par incrustation quatre grandes glaces carrées, de 30 à 40 pouces de côté (*fig.* 297); leurs bords verticaux sont travaillés de manière qu'ils se joignent très-exactement, et on les colle ensemble, de peur que l'air n'y puisse trouver quelque issue. Une cinquième glace, un peu plus grande, s'ajuste sur les premières pour fermer exactement l'appareil; elle est percée de deux ouvertures circulaires, l'une au centre, sur laquelle s'élève un tube de verre *t*, de 12 à 15 pouces de hauteur et de 2 ou 3 pouces de diamètre, et l'autre sur le côté, par laquelle on introduit les corps électrisés. Au-dessus du tube de verre est un micromètre pareil à celui de la balance magnétique; le fil de cuivre ou d'argent qui est fixé au treuil de ce micromètre porte à sa partie inférieure une légère aiguille en gomme laque, très-bien équi-

librée, et terminée par une petite balle de sureau ou par un disque de clinquant de 6 à 8 lignes de diamètre. Sur le contour de la cage, et vers le milieu de sa hauteur, est une bande de papier qui porte les degrés; le fil de torsion doit toujours, comme nous l'avons vu, passer par le centre de ces divisions. Au fond de la balance on met du muriate de chaux dans une capsule, pour absorber l'humidité de l'air.

Pour déterminer, avec cet appareil, la loi des répulsions électriques, on donne d'abord de l'électricité à la balle de l'aiguille suspendue; et ensuite, à l'extrémité d'un tube de verre ou d'un fil de soie, enduit de gomme laque, est une autre balle électrisée de la même manière, que l'on fait descendre dans la balance, avec la précaution de la maintenir à très peu près sur la circonférence que la balle mobile peut décrire dans son mouvement révolutif. La répulsion s'exerce entre ces deux balles comme entre deux pôles magnétiques de même nom, et l'expérience s'achève en effet, de la même manière. En donnant aux balles des électricités contraires, on détermine aussi la loi des attractions électriques comme celles des attractions magnétiques.

Pour démontrer que les attractions et les répulsions sont en raison composée des quantités d'électricité, il faut s'appuyer sur ce principe évident de lui-même: que deux sphères conductrices et de même rayon, qui sont mises en contact, se partagent également les électricités qu'elles possèdent. Ainsi, après avoir observé la force de torsion qui fait équilibre à l'action attractive ou répulsive des deux balles à une distance connue, si l'on vient toucher l'une d'elles avec une troisième balle isolée qui lui soit exactement pareille, on lui enlève la moitié de l'électricité qu'elle possède, et l'on reconnaît que, pour la même distance, la force de torsion se trouve réduite à moitié. En prenant une seconde fois, par le même procédé, la moitié du fluide qui reste encore sur l'une ou sur l'autre des balles, on réduirait encore la force à la moitié de sa valeur; et, si l'on prenait simultanément la moi-

tié du fluide qui se trouve sur chacune des balles, la force serait réduite au quart de ce qu'elle était.

Coulomb a encore constaté les mêmes lois, avec la même précision, en faisant osciller devant un globe électrisé une petite aiguille de gomme laque suspendue à un fil de soie et portant à l'une de ses extrémités un disque de clinquant destiné à recevoir l'un ou l'autre fluide. Cet appareil devient tout-à-fait semblable à celui que nous avons décrit pour le magnétisme : seulement, la réaction électrique qui s'exerce alors entre le globe et le disque est la seule cause des oscillations; d'où il résulte que, pour des charges ou pour des distances différentes, les intensités des forces sont entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations que l'aiguille exécute dans le même temps.

202. *De la perte de l'électricité par l'air et par les supports.* — L'électricité des corps disparaît avec le temps : elle se dissipe dans l'air ou s'écoule dans le sol ; c'est un fait qui se constate par toutes les expériences électriques. Ne pouvant empêcher cette déperdition, nous devons nous attacher à la rendre plus lente, plus régulière et plus mesurable : sans cela, toute comparaison serait impossible entre les forces, puisqu'à chaque instant elles seraient variables et changeraient irrégulièrement suivant des lois inconnues.

La perte, par les supports isolans, se fait en partie au travers de leur substance, et en partie sur la mince couche d'humidité dont ils sont très-souvent revêtus. Cette dernière cause est très-influente pour le verre et la soie, qui absorbent la vapeur d'eau avec une grande avidité. C'est pourquoi il est toujours nécessaire d'enduire la surface de ces corps d'une couche de gomme laque, soit en les plongeant dans de la gomme laque fondue, soit en les couvrant d'un vernis de cette substance : avec cette précaution, les supports de verre et de soie, et ceux de gomme laque pure, isolent à-peu-près au même degré; il paraît même, d'après les expériences de Coulomb, qu'ils peuvent isoler complètement les

faibles charges électriques, lorsqu'ils ont une longueur de 15 ou 20 pouces et qu'on prend soin de les chauffer avant l'expérience pour vaporiser l'humidité qui s'y attache. Cependant, puisqu'ils n'isolent complètement que sous la condition d'avoir une grande longueur, il est évident qu'ils s'imprègnent toujours d'une petite quantité d'électricité, et l'on conçoit ainsi qu'une charge plus forte, réagissant sur elle-même avec plus d'énergie, repousse le fluide jusqu'à l'extrémité du support, et le force à passer dans le sol par un écoulement lent et continu. On reconnaît qu'un corps est parfaitement isolé lorsqu'en le soutenant par plusieurs supports il éprouve la même perte que s'il était soutenu par un seul, et l'on est alors bien assuré que la perte qu'il éprouve est due au contact de l'air.

La perte par l'air est due en grande partie à la vapeur d'eau qui est toujours plus ou moins abondante dans l'atmosphère, car elle augmente à mesure que l'hygromètre marche à l'humidité : le fait est si frappant que, par exemple, si l'on souffle sur un tube électrisé ou sur un bâton de résine, il ne reste pas de trace de son électricité ; il en est de même quand on souffle sur un corps conducteur isolé, mais, dans ce cas, il ne faut pas souffler de trop près, de peur de recevoir la commotion. L'électricité qui s'écoule ainsi par la vapeur d'eau se répand de proche en proche dans l'atmosphère environnante, et il est probable que la transmission ne se fait pas sans que les molécules de vapeur éprouvent une grande agitation. Toute la perte d'électricité qui se fait dans l'air n'est pas due à la présence de la vapeur : l'air le plus complètement desséché par le muriate de chaux, par l'acide sulfurique ou par les autres corps absorbans, laisse encore échapper, avec le temps, une certaine proportion du fluide électrique des corps qu'il enveloppe. On en peut faire l'expérience dans la balance de Coulomb, après avoir desséché l'air qu'elle contient et après avoir électrisé la balle de l'aiguille et la balle fixe. Supposons, par exemple, que ces deux

balles soient maintenues à 20° de distance, par une torsion de 250° du micromètre supérieur : la force qui fait équilibre à la répulsion électrique est alors de $250 + 20 = 270°$; avec le temps on verra les deux balles se rapprocher, et après 1′ il faudra détordre le micromètre supérieur de 6°, par exemple, pour la remettre à la distance primitive de 20°. Ainsi, en 1′, *la force électrique perdue* sera celle qui fait équilibre à 6° de torsion, et, si l'on veut avoir son rapport à la *force électrique moyenne* qui a lieu pendant cette minute, il suffira de remarquer qu'au commencement cette force était 270° ; qu'à la fin elle était $244 + 20 = 264$, dont la moyenne est $\frac{270+264}{2} = 267$; d'où il résulte enfin que la perte a été, pendant une minute, $\frac{6}{267} = \frac{1}{44,5}$, c'est-à-dire un quarante-quatrième à-peu-près de la force moyenne.

C'est de cette manière que Coulomb est parvenu à évaluer exactement la perte par l'air : dans les jours secs, on trouve souvent qu'elle n'est par minute que $\frac{1}{60}$ ou même $\frac{1}{70}$ de la force moyenne : mais, dans les temps un peu humides, elle est quelquefois de $\frac{1}{20}$; alors, il est à-peu-près impossible de faire des expériences exactes. Lorsqu'il y a peu de variations atmosphériques soit dans la chaleur, soit dans la direction du vent, la perte par l'air reste sensiblement la même dans le cours d'une journée, et l'on peut facilement comparer la perte qui a eu lieu dans la balance à celle qui a lieu au-dehors sur un corps conducteur électrisé : pour cela, on vient toucher ce corps avec une balle isolée ou avec un plan d'épreuve que l'on reporte à l'instant dans la balance ; on le met en contact avec la balle de l'aiguille, et l'on observe la répulsion; puis, après quelques minutes, on répète la même expérience, en ayant soin toutefois de remettre à l'état naturel le plan d'épreuve et la balle mobile; et alors on observe une répulsion moindre, ce qui est une marque certaine qu'au second contact le corps avait moins d'électricité puisqu'il en a moins donné au plan d'épreuve. Or, en admettant, comme nous le verrons plus loin, qu'un corps donne au

plan d'épreuve qui le touche, *au même endroit* et *de la même manière*, des quantités d'électricité proportionnelles à celles qu'il possède, on voit que les charges électriques du corps, aux deux époques du contact, seront proportionnelles aux forces de torsion, et qu'ainsi il sera facile de déterminer la perte qu'il a éprouvée dans l'intervalle. Ces moyens de comparer les forces électriques, et de calculer ce qu'elles doivent être à chaque instant lorsqu'on sait ce qu'elles sont à une époque donnée, est une des plus belles inventions qui aient été faites en électricité: c'est par là seulement que Coulomb a pu établir sur des bases certaines les principes fondamentaux de la science.

203. *Distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs.* — L'électricité naturelle est uniformément répandue dans toute la masse d'un corps conducteur, et elle y paraît accumulée en quantité indéfinie, comme la chaleur et le magnétisme : mais, dès qu'un fluide est libre ou séparé de l'autre, il réagit sur lui-même par sa force répulsive, et toutes ses molécules tendent sans cesse à se disperser, jusqu'à ce qu'elles trouvent un obstacle qui les arrête. Un corps qui serait parfaitement conducteur n'offrirait dans toute sa masse aucune résistance à cette dispersion, et le fluide, parvenu rapidement à sa surface, en sortirait pour se répandre plus loin s'il y rencontrait encore un espace également perméable : le vide laissant passer l'électricité, un corps électrisé qui serait placé au milieu du vide perdrait à l'instant tout son fluide libre. Ainsi, la terre est probablement, parmi les planètes, la seule qui puisse être électrisée à sa surface, puisqu'elle est la seule qui paraisse avoir une atmosphère autour d'elle. Nous verrons que les métaux eux-mêmes n'ont pas une conductibilité parfaite : cependant, le fluide électrique passe avec une telle rapidité, d'un point à un autre de leur masse, que nous pouvons, du moins pour le moment, supposer que l'électricité dont ils sont chargés n'a aucune résistance à vaincre pour se mouvoir dans leur

substance. Il résulte de cette hypothèse que l'électricité libre, développée en un point quelconque d'un conducteur métallique, vient toujours à sa surface où elle se trouve arrêtée par l'air environnant. Mais comment s'arrange-t-elle dans la masse entière du conducteur? Faut-il, pour l'équilibre, qu'elle s'y répande uniformément, comme l'air se répand dans un ballon? ou bien, faut-il que ses molécules, obéissant à leur force répulsive, viennent s'accumuler et se presser contre l'air qui enveloppe sa surface, ou contre les corps non conducteurs qui la couvrent?

Voici trois expériences qui peuvent jeter quelque lumière sur ce point fondamental de la théorie :

1° Un globe isolé, représenté figure 300, est recouvert de deux hémisphères en papier métallique ou en clinquant, que l'on peut à volonté mettre ou enlever au moyen de deux manches de verre v et v' : on l'électrise dans cet état; ensuite on enlève rapidement les hémisphères, et le globe ainsi dépouillé de son enveloppe est aussi dépouillé complètement de son électricité. Donc, le fluide se porte à la surface, et s'y accumule de telle sorte qu'il n'en reste pas à l'intérieur.

2° Une sphère de 7 ou 8 pouces de diamètre, ayant une petite cavité de 8 ou 10 lignes de largeur et de 1 pouce de profondeur, est isolée et chargée d'électricité : lorsqu'on vient avec le plan d'épreuve la toucher à sa surface, on y prend du fluide; mais, lorsqu'on la touche au fond de la cavité le plan d'épreuve reste sensiblement à l'état naturel.

3° Enfin, deux sphères conductrices de même rayon sont électrisées ensemble, et ensuite séparées. On vient toucher l'une d'elles avec une sphère pleine en métal, et l'autre avec une sphère de même rayon que la précédente, mais faite avec du clinquant ou du papier doré, ou simplement en collant des feuilles d'étain ou d'or battu sur un globe de résine. Après le contact on essaie, avec le plan d'épreuve et la balance, les forces électriques des deux premières sphères, et on les trouve exactement pareilles ; donc la sphère pleine

en métal n'a pas plus enlevé d'électricité à la première que la sphère *superficielle* n'en a enlevé à la seconde : ce qui est une preuve évidente que l'électricité libre ne réside jamais dans l'intérieur des corps, qu'elle est toujours à la surface, et même qu'elle n'y occupe qu'une épaisseur insensible; car, si la couche de fluide électrique devait être plus épaisse qu'une feuille d'or battu, la sphère superficielle n'en prendrait pas autant que la sphère pleine.

Ces preuves expérimentales sont encore confirmées par une preuve mathématique : car cet arrangement de fluide électrique dans son état d'équilibre est une conséquence rigoureuse de la répulsion, qui agit sur ses molécules en raison inverse du carré de la distance.

De ce que le fluide électrique, repoussé par lui-même, forme à la surface des corps une épaisseur moindre qu'une feuille d'or battu, il n'en faudrait pas conclure que cette épaisseur est insensible, et qu'elle n'entre pour rien dans les phénomènes. Les dimensions qui échappent à la prise directe de nos sens n'en sont pas moins comparables entre elles; et les épaisseurs infiniment petites des couches électriques peuvent être décuples ou centuples l'une de l'autre, comme les épaisseurs qui se comptent par toises ou par mètres. Sur un globe conducteur électrisé (*fig.* 298), tout étant symétrique autour du centre, il est évident que la couche électrique doit avoir partout la même épaisseur; ainsi elle est comprise entre la surface *e e'* du globe, où elle s'arrête contre l'air, et une autre surface *i i'*, pareillement sphérique, qui passe *au-dessous* ou *au-dedans* de la première d'une quantité infiniment petite: cette surface *intérieure* de la couche électrique est sa surface *libre*. Il semble d'abord qu'une molécule de fluide, telle que *m*, ne puisse être en équilibre dans cet état, mais, en concevant le plan *p m p'*, on verra que, si tout le fluide qui est au-dessus tend, par sa répulsion, à précipiter la molécule *m* vers le centre, tout le fluide qui est au-dessous tend, au contraire, à la repousser vers la surface;

et l'on démontre mathématiquement que, par la loi de la raison inverse du carré de la distance, ces deux forces opposées doivent exactement se faire équilibre. Il n'en est pas de même d'une molécule m' de la surface extérieure : celle-ci est repoussée loin du centre par toutes les molécules du fluide : de là l'effort continuel qu'elle exerce contre l'air ou contre les corps non conducteurs sur lesquels elle s'appuie.

M. De Laplace a démontré que le fluide électrique a une force répulsive qui est partout proportionnelle à son épaisseur ; et, comme la pression qu'il exerce contre l'air ou contre les obstacles qui l'arrêtent est en raison composée de sa force répulsive et de son épaisseur, il en résulte que cette pression, en chaque point, ou sur chaque élément de surface, est proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche qui se trouve en ce point ou sur cet élément. Ainsi, le fluide électrique répandu sur les corps conducteurs peut être considéré comme les fluides pondérables contenus dans des vases contre lesquels ils exercent des pressions : quand ces vases sont assez résistans, le fluide est contenu ; quand ils sont trop faibles pour résister à la pression, les parois crèvent et le fluide s'écoule : pour le fluide électrique, le vase est le corps conducteur, la paroi est l'air qui l'enveloppe ou la couche de vernis non conducteur qui le couvre ; et, quand l'épaisseur de l'électricité est assez grande, elle fend l'air ou elle perce la couche de vernis, et l'étincelle jaillit, ce qui est la marque d'un écoulement rapide du fluide. Quand la couche électrique est arrêtée et maintenue en équilibre, il est évident que la somme des actions qu'elle exerce sur un point intérieur quelconque, tel que n, est toujours nulle : sans cela, elle opérerait par influence une nouvelle décomposition des fluides naturels qui sont en ce point, et l'équilibre serait troublé.

Sur un ellipsoïde de révolution (*fig.* 299), l'épaisseur électrique n'est plus la même aux différens points de la surface. Il résulte des conditions mathématiques dont nous venons de

parler qu'au pôle p et en un point q de l'équateur, les épaisseurs sont entre elles comme les rayons vecteurs cp et cq; par conséquent, les pressions sont entre elles comme les carrés de cp et cq. Par exemple, si l'ellipsoïde est très-allongé, de telle sorte que $cp = 100\ cq$, la pression au point p sera 10,000 fois plus grande qu'au point q; c'est donc toujours par l'extrémité la plus amincie de l'ellipsoïde que le fluide devra s'écouler.

Une pointe très-aiguë peut toujours être considérée comme étant le pôle d'un ellipsoïde de révolution très-allongé; ainsi, quelque faible que soit la charge électrique d'un tel corps, le fluide qui s'accumule à son sommet y formera toujours une épaisseur assez grande pour vaincre la résistance de l'air: de là *le pouvoir des pointes*, qui avait été découvert par Franklin avant qu'il fût expliqué par la théorie. On dit quelquefois que les pointes ont le pouvoir d'attirer le fluide électrique; c'est précisément le contraire qu'il faut dire: elles ont la propriété de laisser écouler le fluide dont elles sont chargées. On peut faire une foule d'expériences sur cette propriété; nous indiquerons les suivantes:

1° Une pointe aiguë étant placée sur les conducteurs de la machine, il devient impossible de leur donner de l'électricité et d'en tirer des étincelles : le fluide se dissipe par la pointe à mesure qu'il se développe par le mouvement de la machine.

2° Une pointe communiquant au sol, étant présentée aux conducteurs de la machine à un pied de distance, il devient pareillement impossible de les charger : l'électricité du conducteur décompose par iufluence les électricités de la pointe; elle repousse dans le sol celle de même nom et attire celle de nom contraire, qui s'accumule à la pointe, et qui s'échappe à travers l'air pour venir neutraliser celle du conducteu .

3° Un *timbre à pointe* (*fig.* 301) étant sous les conducteurs de la machine, à deux ou même à trois pieds de distance, le bruit des petits pendules p et p' annonce l'écoulement de l'é-

ectricité. Cette expérience est la même que la précédente : les lignes noires représentent sur la figure les fils qui doivent être non conducteurs.

Nous devrons revenir sur les propriétés des pointes lorsque nous parlerons de la lumière électrique, et surtout lorsque, dans la Météorologie, nous aurons à étudier l'électricité atmosphérique et la construction des paratonnerres.

Les angles et les arêtes des corps conducteurs présentent des phénomènes analogues à ceux des pointes ; c'est pourquoi il faut éviter soigneusement toutes les formes anguleuses dans les appareils qui sont destinés à conserver l'électricité.

Les résultats précédens nous conduisent à une question générale, dont nous pouvons maintenant comprendre le sens et l'étendue. Des corps conducteurs sont donnés, on connaît leurs formes et leurs grandeurs : les uns sont à l'état naturel, les autres ont des charges connues d'électricité résineuse ou vitrée ; on les met en présence pour former un système connu de position ; on suppose que les fluides réagissent simplement sans passer d'un corps à l'autre ; et l'on demande quel est l'état électrique d'un point quelconque de ce système, c'est-à-dire quelle espèce d'électricité s'y trouve, et quelle épaisseur elle y forme.

Coulomb a donné un moyen expérimental de résoudre ce problème dans toute son étendue. Voici le principe sur lequel il repose : quand un plan d'épreuve, très-mince et assez petit, est posé tangentiellement sur une surface électrisée et retiré perpendiculairement sans la toucher par ses bords, il est chargé sur chaque face d'une épaisseur électrique qui est la moitié de celle que possédait la surface au point de contact. Coulomb a démontré ce principe, en déterminant le rapport suivant lequel l'électricité se partage entre une sphère et un plan circulaire qui vient la toucher par son centre et qui s'est retiré perpendiculairement. Mais on peut encore s'en rendre compte d'une autre manière : quand le plan d'épreuve est tangent à une sur-

face, il se confond avec l'élément qu'il touche, il prend en quelque sorte sa place relativement à l'électricité, ou plutôt il devient lui-même l'élément sur lequel le fluide se répand ; ainsi, quand on retire ce plan, on fait la même chose que si l'on avait découpé sur la surface un élément de même épaisseur et de même étendue que lui, et qu'on l'eût enlevé pour le porter dans la balance sans qu'il perdît rien de l'électricité qui le couvre ; une fois séparé de la surface, cet élément n'aurait plus dans ses différens points qu'une épaisseur électrique moitié moindre, puisque le fluide devrait se répandre pour en couvrir les deux faces. Ce principe posé, l'expérience n'exige plus que de l'habitude et de la dextérité : après avoir touché un point de la surface avec le plan d'épreuve, on l'apporte dans la balance, où il partage son électricité avec le disque de l'aiguille qui lui est égal, et l'on observe la force de torsion à une distance connue. On répète la même expérience, en touchant un autre point, et le rapport des forces de torsion est le rapport des répulsions électriques ; on en prend la racine carrée pour avoir le rapport des épaisseurs. Ainsi, le génie de Coulomb a donné en même temps aux mathématiciens la loi fondamentale suivant laquelle la matière électrique s'attire et se repousse ; et aux physiciens une balance nouvelle et des principes d'expérience au moyen desquels ils peuvent en quelque sorte sonder l'épaisseur de l'électricité sur tous les corps et déterminer les pressions qu'elle exerce sur les obstacles qui l'arrêtent.

Le problème général dont nous venons de parler, et qui peut être dans tous les cas si facilement et si complètement résolu par l'expérience, peut être attaqué aussi par l'analyse mathématique. M. Poisson a publié deux Mémoires sur ce sujet (*Mém. de l'Institut*, 1811, 1re et 2e parties) : en s'appuyant sur la loi de Coulomb, et sur quelques théorèmes fondamentaux de l'attraction des sphéroïdes démontrés par M. De Laplace, il parvient à des équations géné-

rales, qu'il résout ensuite, pour le cas d'un ellipsoïde ou de deux sphères, au moyen de ces savans artifices de calcul qui lui sont si familiers.

Dans l'impossibilité où nous sommes de faire connaître ce travail, même par extrait, nous nous contenterons de citer quelques-uns des résultats les plus remarquables; ils sont d'autant plus décisifs, pour prouver l'exactitude de l'analyse, que Coulomb les avait démontrés par l'expérience. (*Mém. de l'Académie*, 1787.)

1° Quel que soit le rapport des rayons de deux sphères électrisées, quand elles se touchent, l'épaisseur électrique est nulle au point de contact.

2° A partir du point de contact, l'épaisseur électrique croît lentement; dès qu'elle devient sensible, elle est plus grande sur la sphère du plus grand rayon; mais ensuite, à une certaine distance, elle commence à croître plus rapidement sur la plus petite sphère, de telle sorte qu'elle y est toujours plus grande à une demi-circonférence de distance du point de contact.

3° En ces points, diamétralement opposés au point de contact, le rapport des épaisseurs est d'autant plus grand que la petite sphère est plus petite, mais il tend vers une limite qui est 4,2.

4° Quand on sépare ces sphères, et qu'on les soustrait à leur action mutuelle, l'épaisseur électrique est toujours plus grande sur la plus petite; le rapport de ces épaisseurs tend pareillement vers une limite, qui est $\frac{5}{3}$.

5° Quand on écarte seulement ces sphères à des distances diverses, de manière qu'elles restent soumises à leur influence mutuelle, leur électricité commune étant, par exemple, la vitrée, la petite sphère prend l'électricité *résineuse* au point *le plus voisin* de la grande sphère, et à une certaine distance autour de ce point; elle continue d'être électrisée *résineusement dans cette partie*, à mesure qu'on l'éloigne, mais de moins en moins; quand l'intervalle qui

sépare les sphères est (dans les circonstances les plus favorables) égal à-peu-près au demi-rayon de la plus grande, l'électricité résineuse disparaît; et, au-delà, la petite sphère devient vitrée sur toute sa surface, comme la plus grande. Quand le rayon de la petite sphère surpasse le sixième du rayon de la grande, l'électricité résineuse paraît encore, mais elle disparaît avant que l'intervalle des sphères soit égal au demi-rayon de la plus grande.

6° Quand une petite sphère, prise à l'état naturel, est électrisée par l'influence d'une sphère plus grande, elle réagit sur celle-ci pour troubler l'épaisseur uniforme de sa couche électrique, et alors cette épaisseur va en décroissant depuis le point le plus voisin de la petite sphère jusqu'à une distance de $\frac{3}{4}$ de circonférence; au-delà, elle redevient croissante jusqu'au point diamétralement opposé.

CHAPITRE IV.

De l'Électricité dissimulée.

204. *De la dissimulation de l'électricité et de sa recomposition lente ou subite.* — Concevons deux disques conducteurs a, a' (*fig.* 315) mis en présence et séparés par une lame non conductrice n de verre ou de résine ; quand le disque a reçoit par exemple de l'électricité vitrée, et le disque a' de la résineuse, ces deux électricités s'attirent au travers de la lame non conductrice n et en pressent les deux faces opposées par l'effort qu'elles font pour se rejoindre : on dit alors que ces électricités sont *dissimulées*. Et, en effet, quand les disques sont chargés, on peut les toucher l'un ou l'autre sans que leur fluide s'écoule dans le sol, mais il faut les toucher *séparément* et non pas *simultanément ;* le fluide de celui qui est touché n'obéit pas à la force répulsive qui lui est propre, parce qu'il est attiré et retenu par le fluide de l'autre. Ainsi, les plus fortes charges électriques s'accumulent sur les disques, se pressent sur les faces opposées de la lame non conductrice, et restent dissimulées l'une par l'autre tant que l'on n'offre d'issue dans le sol qu'à *l'un* des deux fluides. Supposons que les deux disques soient mathématiquement de même forme et de même grandeur ; que la lame n soit bien plane sur ses deux faces, et partout également épaisse ; et que la machine ou la source quelconque, qui donne de l'électricité vitrée au disque a, par le moyen du fil f, soit exactement de même force que celle qui donne de l'électricité résineuse au disque a', par le fil f', de telle sorte que tout soit symétrique de part et d'autre du plan qui passe au milieu de l'épaisseur n : alors, il est évident que les deux disques auront toujours des charges

égales, et que dans les points symétriquement placés sur chacun d'eux, les épaisseurs ou les tensions électriques seront aussi toujours les mêmes. Cela posé, voici un principe fondamental de l'électricité dissimulée : c'est qu'après avoir donné à l'appareil une charge quelconque, et l'avoir isolé ensuite en supprimant la communication des fils *f* et *f'* sans les laisser toucher au sol, il arrive toujours que la *dissimulation est incomplète*, c'est-à-dire qu'il n'existe aucun point sur les disques ni sur les fils où la tension électrique soit tout-à-fait nulle. Cette tension est très-grande sur les faces intérieures *i* et *i'* ; et là, quand les surfaces ont assez d'étendue, les fluides peuvent presser la lame *n* avec tant de force qu'ils s'ouvrent un passage au travers de sa substance et la percent pour se rejoindre : si cette lame est de résine ou de soufre, il se fait alors une multitude de petites fissures imperceptibles; mais, si elle est de verre mince, les fluides ne font qu'un seul trou, par lequel ils se précipitent avec éclat pour se recomposer. Sur les faces extérieures *e*, *e'*, et sur les fils *f f'*, la tension électrique qui s'exerce contre l'air est très-faible en comparaison de la tension intérieure : mais elle existe, comme on peut s'en assurer avec le plan d'épreuve, ou même en présentant la jointure du doigt successivement à chaque disque ou à chaque fil, car on en tire de petites étincelles. La dissimulation ne peut pas être complète, parce que les fluides accumulés pour la plus grande partie sur les faces intérieures *i* et *i'* restent encore séparés par l'épaisseur de la lame non conductrice *n*, et que c'est au contact seulement qu'ils peuvent être neutralisés en totalité l'un par l'autre. Ainsi, la dissimulation est d'autant plus parfaite que la lame non conductrice est plus mince; mais, en même temps, plus la lame est mince et moins elle offre de résistance à la pression électrique. C'est là, comme nous le verrons tout-à-l'heure, ce qui limite le degré d'accumulation que nous pouvons donner à l'électricité.

L'appareil étant chargé comme nous venons de le dire,

les électricités dissimulées peuvent se recomposer subitement ou lentement.

La *recomposition subite* se détermine de la manière suivante : on prend par ses manches isolans *mm'* *l'excitateur* *bcb'* (*fig.* 316), dont les deux arcs en cuivre *bc*, *cb'* sont mobiles autour de la charnière *c*; on touche l'un des disques avec la boule *b'*, et on approche de l'autre disque la boule *b'*, à un ou deux pouces de distance; l'étincelle jaillit avec beaucoup d'éclat et de bruit, et l'appareil est déchargé. Par la tension électrique qui est au point de contact *b*, une partie du fluide vitré se répand sur tout l'excitateur; alors, le fluide résineux est moins attiré qu'il n'était, son épaisseur diminue sur la face *i'* et augmente sur la face extérieure *e'*, d'où il attire le fluide vitré qui est en *b* : cette attraction fait affluer le fluide vitré vers *b'*, il s'accumule en cet endroit, il diminue sur le disque *a*, et en même temps le fluide résineux, devenu plus libre, se porte et s'accumule vers la face extérieure de *a'* où il est maintenant attiré; enfin la tension est assez forte pour s'ouvrir un passage dans l'air, et tout le fluide se précipite et se recompose à l'instant.

La *recomposition lente* offre des phénomènes curieux, et montre mieux encore le jeu des électricités dissimulées. Les disques étant électrisés et isolés (*fig.* 317), deux petits pendules *pp'* communiquant avec leurs faces extérieures éprouvent une répulsion produite par l'électricité qui est libre sur ces faces ; en touchant le disque *a*, par exemple, on en tire une petite étincelle, le pendule *p* retombe, et le pendule *p'* se relève à l'instant comme si le disque *a'* eût pris une charge nouvelle, mais cet accroissement de répulsion résulte seulement du fluide résineux qui est devenu libre par la perte de vitré qu'a éprouvée le disque *a*; on touche ensuite le disque *a'*, son pendule retombe, et celui de *a* se relève; on retourne au disque *a*, le même phénomène se reproduit; et ainsi de suite, alternativement, jusqu'à ce que l'appareil soit complètement déchargé.

Nous avons supposé que les disques recevaient de l'électricité, l'un d'une source résineuse, et l'autre d'une source vitrée, et que chacun d'eux en recevait des quantités égales; mais le plus souvent on n'emploie qu'une seule machine: le disque *a*, par exemple, est mis en communication avec elle, et le disque *a'* en communication avec le sol; alors celui-ci se charge *par influence*, et la charge qu'il prend est toujours moindre que la charge de *a*. Quand les communications sont rompues, le pendule *p'* est au repos, et le pendule *p* diverge; mais, la perte par l'air se trouvant proportionnellement plus grande sur le disque *a*, on voit son pendule s'abaisser peu-à-peu, tandis que le pendule *p'* se relève, et, l'égalité de divergence une fois établie, la perte par l'air devient égale; les deux pendules retombent ensemble, d'autant plus lentement que l'air est plus sec. Au lieu de deux disques séparés par une lame de verre, on peut employer, pour les expériences précédentes, un simple carreau de verre sur les faces duquel on colle des feuilles d'étain, en laissant à découvert sur les bords un espace de deux ou trois pouces que l'on vernit pour augmenter son inconductibilité (*fig.* 318).

205. *Des condensateurs.* Tous les appareils dans lesquels on accumule de l'électricité dissimulée se composent essentiellement de deux lames conductrices, séparées par une lame non conductrice, et on les nomme en général des *condensateurs*, parce qu'en effet le fluide électrique paraît se condenser en se dissimulant. Ces appareils changent de forme et de nom suivant les usages auxquels on les destine.

Ceux qui nous ont servi aux expériences précédentes (*fig.* 315, 316, 317 et 318) sont des *condensateurs à lames de verre*; ils sont capables d'accumuler de grandes quantités d'électricité, mais, à cause de l'épaisseur du verre, ils ne peuvent être chargés que par des machines, par des électrophores, ou en général par des sources électriques d'une grande tension.

Le *condensateur à taffetas* (*figure* 319) est composé d'un

disque de bois *bb'* revêtu d'un taffetas vernissé *t t'*, et d'un plateau conducteur *c c'* à manche isolant *m*. Le plateau étant mis en communication avec une source électrique, soit directement soit au moyen de la tige à boule *g b*, le fluide se répand sur toute sa surface, agit par influence, au travers du taffetas, sur les électricités naturelles du disque de bois qui doit communiquer au sol, et l'appareil se charge en raison de la tension de la source qui lui fournit du fluide. Ensuite, on soulève le plateau perpendiculairement pour le séparer du taffetas, et pour reconnaître, par l'électroscope ou par la balance, l'espèce et la quantité de l'électricité qui le charge. Le taffetas est moins épais que le verre, mais aussi il est moins solide ; d'où il résulte que ce condensateur prend toujours plus d'électricité que le précédent, et qu'il ne peut jamais résister à des charges aussi fortes : il est bon pour essayer le fluide des sources qui n'ont pas une grande tension.

Le *condensateur à lames d'or* (*fig.* 320) n'est autre chose qu'un électroscope à lames d'or sur lequel on adapte deux plateaux métalliques, minces et bien dressés : le supérieur *c c'* est mobile et s'enlève par un manche isolant, l'inférieur *f f'* est fixé à la garniture *g g'* de la cloche *h h'*, et la lame non conductrice qui les sépare est disposée avec beaucoup d'art et de soin. Après avoir séparé les plateaux, on les enduit successivement, avec un pinceau, de plusieurs couches d'un vernis très-liquide formé par la dissolution de la gomme laque dans l'alcool : ce vernis sèche, et la pellicule qu'il forme est suffisante pour arrêter l'électricité ; son épaisseur n'est pas de un dixième de millimètre. Ainsi, les plateaux sont presque en contact, et la dissimulation de l'électricité est aussi complète qu'il soit possible : à cet égard, le condensateur à lames d'or est le plus parfait que l'on connaisse, mais, les couches minces de vernis n'offrant que très-peu de résistance, il ne peut supporter que les plus faibles charges. Cet appareil nous servira plus tard à une foule de recherches

sur l'électricité, qui se développe soit par le simple contact des corps, soit par les actions chimiques auxquelles ils sont soumis. Pour les expériences délicates, il est bon de tenir la cloche du condensateur enveloppée d'une cage en verre dans laquelle on dessèche l'air avec quelque corps absorbant.

206. *De la bouteille de Leyde, et des batteries électriques.* — Un vase de verre, revêtu à l'extérieur d'une feuille d'or ou d'étain montant jusqu'à quelques pouces des bords, et pareillement revêtu à l'intérieur, ou seulement rempli de quelques substances conductrices, d'eau, de grenailles de plomb, de feuilles d'or ou de clinquant, forme ce qu'on appelle une *bouteille de Leyde* (*fig.* 321), ou une *jarre électrique* (*fig.* 322); la tige *t b* s'appelle *le bouton*, *le crochet* ou *l'intérieur* de la bouteille, parce qu'elle sert en effet à mettre la face intérieure en communication avec le sol ou avec les sources électriques; tout l'espace compris entre le goulot *g' g* et l'*armature extérieure a a'* est verni avec beaucoup de soin.

Pour charger la bouteille, on la tient à la main par *la panse* ou par l'armature extérieure, et l'on met le bouton en communication avec les conducteurs de la machine, soit au contact, soit plutôt à une petite distance, afin de voir jaillir une foule d'étincelles qui se succèdent rapidement d'abord, puis qui se ralentissent de plus en plus, et qui indiquent ainsi le degré de la charge. L'électricité vitrée des conducteurs passe dans la bouteille, se répand sur toute la surface intérieure, et de là, agissant par influence à travers l'épaisseur du verre, elle décompose les électricités naturelles de l'armature extérieure, attire la résineuse, qui s'accumule et se condense sur la paroi du verre, et repousse la vitrée, qui s'écoule dans le sol par la main et par le corps qui lui offrent un passage. On pourrait charger la bouteille en sens inverse, en tenant le crochet à la main et en présentant la panse aux conducteurs; mais, dans tous les cas, la communication de l'une des faces avec le sol n'est pas moins essentielle que la communication de l'autre avec la machine. Quel-

quefois la bouteille se décharge spontanément avec beaucoup d'éclat : tantôt l'étincelle part entre le bouton et l'armature extérieure, alors on peut recommencer la charge ; tantôt elle part à travers l'épaisseur du verre, alors la bouteille est percée et hors de service.

Quand la bouteille est chargée, on la pose avec précaution sur un isoloir, et l'on peut la décharger subitement avec l'excitateur, ou lentement, en tirant alternativement de la panse et du bouton une foule de petites étincelles.

L'électricité dissimulée ne reste pas sur les armatures intérieure et extérieure : elle les quitte pour s'attacher au verre et se presser sur sa surface. C'est ce que l'on démontre au moyen de la bouteille à *armatures mobiles* (*fig.* 323) : après l'avoir chargée et posée sur un isoloir, on enlève l'intérieur, qui n'emporte avec lui que très-peu d'électricité ; on enlève ensuite le verre, en laissant sur l'isoloir l'enveloppe extérieure, qui ne donne pareillement que de faibles signes électriques : mais, les deux armatures ayant été touchées et remises à l'état naturel, si l'on rapporte le verre dans l'armature extérieure, et l'armature intérieure dans le verre, la bouteille ainsi recomposée a presque la même charge qu'elle avait primitivement ; ce qui prouve d'une manière frappante que, dans la séparation des pièces, ces deux électricités étaient restées attachées à la surface du verre : on pourrait encore s'en assurer en étendant une main dans l'intérieur du verre, et l'autre à l'extérieur, lorsqu'on vient de le dépouiller de ses armatures, car on ne manquerait pas de recevoir une forte commotion.

Lorsqu'on présente à la bouteille plusieurs conducteurs pour la décharger, l'électricité choisit toujours le meilleur : ainsi, en pressant avec une main une chaîne ou un fil de métal sur la panse, on peut impunément avec l'autre main apporter au bouton l'autre extrémité de la chaîne ou du fil, la décharge passe par le métal et jamais par le corps ; cependant il est toujours bon de s'assurer d'avance qu'il n'y a pas

de solution de continuité dans le métal, ou qu'il n'est pas trop mince pour laisser passer tout le fluide, car un fil excessivement fin ne suffirait pas pour détourner le coup.

On mesure la charge d'une bouteille par la distance à laquelle jaillit l'étincelle entre le bouton intérieur et un autre bouton communiquant avec l'extérieur (*fig.* 324): la tige *tq* est divisée, on l'avance doucement au moyen de la vis *v*, et l'on observe la distance à laquelle l'étincelle est partie. Pour que les expériences fussent comparatives, il faudrait que, la boule *b* restant la même, tous les boutons des diverses bouteilles eussent les mêmes dimensions.

Nous rapporterons maintenant diverses expériences dont on pourra facilement se rendre compte au moyen de ce qui précède:

Dans le *carillon* de la figure 325 l'un des timbres communique à l'extérieur de la bouteille, et l'autre à l'intérieur; la petite balle de métal est suspendue par un fil isolant; les oscillations sont d'autant plus rapides que la distance des timbres est plus petite; par un temps sec, et pour de médiocres charges, on en peut toujours compter plusieurs centaines.

L'araignée de Franklin, dont nous avons déjà parlé, peut remplacer la petite balle de métal de l'expérience précédente.

Les figures de Leichtemberg semblent indiquer une différence essentielle entre les deux électricités résineuse et vitrée: on peut les obtenir avec un conducteur ordinaire communiquant à la machine, mais on les obtient plus belles et plus régulières au moyen de la bouteille de Leyde. Pour cela on prend une bouteille chargée et l'on trace des figures sur un gâteau de résine très-sec : d'abord avec le bouton, qui contient par exemple l'électricité vitrée; et ensuite avec la panse, qui contient l'électricité résineuse. Après cela, avec un soufflet qui contient un mélange de soufre et de minium très-bien pulvérisé, on souffle sur le gâteau de résine et l'on distingue alors les traces électriques que la bouteille a laissées

sur la résine. Les traces vitrées deviennent jaunes et les résineuses deviennent rouges, parce que dans la poudre mélangée le soufre est électrisé résineusement et le minium vitreusement. Ces traces sont très-différentes : les jaunes sont comme *hérissées* en filets divergens, tandis que les rouges offrent partout des contours arrondis.

Le perce-carte (*fig.* 330) offre un phénomène curieux ; chaque pointe étant mise en communication avec l'une des faces de la bouteille, l'étincelle part et la carte est percée d'un trou plus grand qu'un trou d'épingle ; des deux côtés, on observe autour du trou un petit bourrelet et des filamens tirés en dehors, comme si le fluide était parti du milieu de la carte pour sortir par ses deux faces. M. Œrsted explique ce fait et beaucoup d'autres analogues, en supposant que l'électricité n'éprouve pas un mouvement de translation dans les corps, mais seulement un mouvement de vibration par lequel s'opèrent, autour de chaque molécule, des décompositions et recompositions successives ; ainsi, le fluide vitré qui se présente au point *a* décompose les fluides naturels des molécules qu'il rencontre, attire le résineux avec lequel il se recombine par une étincelle, repousse le vitré, qui va à son tour décomposer les fluides naturels des molécules suivantes, attirer le résineux pour se recombiner avec lui par une nouvelle étincelle, et repousser le vitré ; et ainsi de suite ; de sorte qu'il y a autant d'étincelles que de molécules de matière pondérable : on peut rendre cette supposition sensible en faisant passer la décharge électrique par des grains de métal enfilés dans la soie et séparés l'un de l'autre.

Nous reviendrons plus tard sur cette importante théorie, qui semble confirmée par tous les faits de l'électricité chimique.

Le trou de la carte ne se fait pas à égale distance des deux pointes ; mais, dans l'air ordinaire, il se fait toujours près de la pointe résineuse, et, dans l'air raréfié sous la cloche de la machine pneumatique, il s'en éloigne pour se rappro-

cher de plus en plus de la pointe vitrée. Ce fait, constaté par M. Trémery, reste sans explication.

Pour percer le verre par la décharge électrique, on change un peu la disposition de l'appareil précédent, parce qu'il est alors nécessaire de mettre à l'extrémité de l'une des pointes une goutte d'un liquide conducteur, une goutte d'huile par exemple, qui touche immédiatement le verre dans une étendue un peu considérable.

Le *perce-verre* est représenté dans la figure 327.

On enflamme les liqueurs spiritueuses avec la bouteille de Leyde plus sûrement qu'avec l'étincelle directe du conducteur de la machine. On peut même enflammer du coton roulé dans le lycopode et dans la résine pulvérisée.

C'est au moyen de la bouteille de Leyde que l'on a essayé d'apprécier la vitesse avec laquelle le fluide électrique se transmet dans les corps. Des fils de métal isolés, dont l'ensemble forme une lieue, transmettent instantanément la décharge électrique ; ces expériences furent faites en France et en Angleterre, de 1745 à 1750. A cette époque on essaya pareillement la transmission de l'électricité par l'eau et par le sol sec ou humide : en partant d'un point donné, un fil de métal de plusieurs centaines de toises de longueur, isolé sur des piquets de bois très-sec, s'en allait s'enfoncer dans le sol par son autre extrémité, après avoir traversé des rivières et des terrains de différentes natures ; au point de départ, il était mis en communication avec l'une des faces de la bouteille, tandis que le sol était mis en communication avec l'autre face; les fluides ne pouvaient se joindre qu'après avoir traversé toute la longueur du fil métallique et toute l'étendue du sol et de l'eau, depuis la seconde extrémité du fil jusqu'au lieu de l'observation ; et, malgré tant d'espace et tant d'obstacles, la décharge de la bouteille était instantanée, comme si elle eût été faite par l'excitateur ordinaire. Dans un point quelconque de cette longue chaîne, on pouvait enflammer des liqueurs spiritueuses, et c'était alors un spectacle fort éton-

nant de voir l'alcool s'enflammer par du feu qui venait de traverser une rivière.

La *commotion* de la bouteille de Leyde est assez forte pour être dangereuse : elle passe par les bras et la poitrine, lorsqu'une main tenant la panse de la bouteille, l'autre en vient toucher le bouton. Alors, les faibles charges se font sentir dans l'avant-bras seulement, les charges un peu plus fortes se font sentir au coude, et les charges plus fortes encore donnent une vive douleur à la poitrine. Pour faire passer la commotion entre deux points donnés du corps, il suffit d'établir des armatures sur ces deux points, c'est-à-dire des plaques de métal que l'on fait communiquer aux deux faces de la bouteille.

Lorsque plusieurs personnes forment *la chaîne* en se tenant par la main, si la première touche la panse de la bouteille et la dernière le bouton, tout le cercle reçoit instantanément la commotion : les personnes qui sont au milieu éprouvent un choc un peu moins vif que celles qui touchent la bouteille. On était autrefois fort curieux de savoir jusqu'où pouvait s'étendre cette puissance du choc électrique, et, après l'avoir tenté sur des cercles nombreux, on l'essaya sur un régiment rangé en bataille, qui fut, dit-on, renversé d'un seul coup.

Les *batteries électriques* (*fig.* 329) sont des réunions de plusieurs bouteilles de Leyde, ou de plusieurs jarres, dont tous les intérieurs communiquent au moyen des tiges de métal t, t', t'', et dont les extérieurs communiquent pareillement, parce que le fond de la caisse en bois b, b', sur lequel ils reposent est une lame de plomb. Lorsqu'on veut charger ensemble plusieurs batteries, on fait communiquer tous les intérieurs entre eux et tous les extérieurs au sol; et pour juger le degré de charge, on emploie le petit électromètre à pendule (*fig.* 326), qui s'ajuste sur les conducteurs de la machine : au commencement, et pendant les premiers tours du plateau, le pendule est presque au repos, parce que les batteries condensent tout le fluide qui se développe; mais, peu-

à-peu le pendule s'élève, et, par les divers angles d'écart qu'il prend, on juge des divers degrés de sa tension électrique, et par conséquent des divers degrés de tension de l'intérieur des batteries, car celles-ci sont toujours dans le même rapport que les premières.

Une batterie peut se décharger comme la bouteille de Leyde, soit lentement, soit rapidement; mais il faut redoubler de précaution pour n'en pas recevoir le choc. L'épaisseur du verre des jarres et la tension de la machine restant les mêmes, la force d'une batterie peut être évaluée par l'étendue de la surface qui se charge; cent pieds carrés condensent cent fois plus d'électricité qu'un seul pied carré, et il faut un homme fort robuste pour soutenir, sans danger, le choc d'un pied carré chargé par une machine ordinaire.

Nous allons indiquer quelques-uns des phénomènes les plus remarquables que l'on peut produire au moyen de ces grandes accumulations d'électricité.

Tous les corps qui reçoivent le choc sont placés entre les deux branches *b* et *b'* de l'*excitateur universel*, qui est représenté dans la figure 333. L'une de ces branches communique avec l'extérieur de la batterie au moyen de la chaîne *c*; l'autre communique avec une chaîne *c'* qui se termine à la boule isolée *b* : lorsqu'on veut faire passer l'étincelle, on prend la boule *b* par l'extrémité de son manche isolant, on l'approche subitement de l'intérieur de la batterie; l'étincelle part, et les fluides se recomposent dans tout le circuit *b*, *c' b' b c*.

Un fil de fer de plusieurs pouces de longueur étant mis entre les branches de l'excitateur, une faible décharge l'échauffe, une forte le fait rougir, une plus forte le fait jaillir en petits globules fondus qui sont lancés au loin, et une plus forte encore le fait disparaître en vapeur. Avec une puissante machine, Van-Marum en a fondu cinquante pieds de longueur.

Une bande étroite de feuille d'étain, de trois ou quatre

pouces de longueur, est volatilisée par une batterie ordinaire, la vapeur s'oxide et forme de longs filamens flottans dans l'air, semblables à des toiles d'araignée.

Les autres métaux peuvent aussi s'échauffer, rougir, se fondre, s'oxider; mais, en les prenant de même longueur et de même diamètre, des charges égales ne produisent pas sur tous les mêmes effets : ceux qui sont plus mauvais conducteurs, comme le platine et le fer, éprouvent, à égalité de dimensions, de plus grands effets de chaleur que l'or et le cuivre qui sont les meilleurs conducteurs.

Les fils de soie dorés présentent un phénomène singulier qui montre avec quelle rapidité les molécules de matière conductrice sont saisies par le choc électrique : l'or qui les couvre est volatilisé et oxidé sans que la chaleur soit seulement capable de rompre la soie. Pour rendre cette expérience plus sensible, on appuie sur le fil une feuille de papier blanc, sur laquelle on voit, après le choc, une large trace de couleur brune. Par le même moyen, on peut enlever la dorure sur un livre ou sur une autre surface non conductrice, pourvu qu'elle n'ait pas trop d'étendue.

On se sert de cette propriété pour faire des *empreintes électriques* : *d c p r* (*fig.* 332) est une *découpure* en papier, à laquelle sont collées deux bandes de feuilles d'étain *f*, *f'*: d'un côté, on la couvre d'une feuille d'or, qui touche l'étain par deux de ses bords; de l'autre, on la couvre d'un ruban de satin; et, pour assurer le contact, on met tout ce système sous la *presse p p'* (*fig.* 331). Les deux bandes d'étain étant mises en communication avec les deux faces de la batterie, l'étincelle part, l'or se volatilise, et, par tous les *jours* de la découpure, il passe sur le ruban où il fait une empreinte de couleur brune très-régulière.

Les fortes charges font une impression remarquable sur les masses métalliques. Priestley a observé qu'elles en liquéfient la surface à l'endroit où elles les traversent : si le métal est peu fusible, on n'aperçoit, après le passage de l'étin-

celle, qu'un *cercle de fusion* d'une ou deux lignes de diamètre; mais, s'il est très-fusible, comme le plomb, l'étain, on aperçoit autour du cercle central jusqu'à trois *anneaux de fusion*, d'une largeur sensible, concentriques, et séparés les uns des autres par des intervalles d'environ une ligne.

Quand l'étincelle passe dans un liquide, elle éclate et brille comme dans l'air; presque toujours le liquide est lancé de toutes parts avec une grande force.

Elle éclate de même dans la *poudre à tirer* et en détermine l'explosion. L'on en peut faire l'expérience avec de petites cartouches de deux ou trois lignes de diamètre, et de quinze ou vingt lignes de longueur : deux fils de fer, traversant les bouts opposés de la cartouche, viennent aboutir vers son milieu à une petite distance l'un de l'autre; c'est en franchissant leur intervalle que l'étincelle enflamme la poudre.

Dans les gaz, l'étincelle produit une expansion si grande et si subite qu'elle peut lancer une petite balle au moyen du *mortier électrique* qui est représenté (*fig.* 328). Kinnersley, qui observa le premier ce phénomène remarquable, inventa aussi un appareil pour en mesurer l'intensité : c'est un tube en verre, fermé et armé par ses deux bouts (*fig.* 334) : l'étincelle part entre les deux boules *bb'*, et un liquide qui s'élève en même temps dans le tube latéral *tt'* donne la mesure de l'expansion. Cet appareil se nomme le *thermomètre de Kinnersley*.

Les mauvais conducteurs sont percés ou brisés par la décharge d'une forte batterie : une pierre plate, de plusieurs lignes d'épaisseur, est percée comme le verre mince ; un cylindre de bois, de deux ou trois pouces de diamètre et d'un demi-pouce d'épaisseur, peut être fendu en éclats par une décharge qui passe dans les sens des fibres.

A la surface de quelques substances l'étincelle laisse une traînée lumineuse qui brille pendant plusieurs secondes et quelquefois pendant plus d'une minute : cette espèce de phosphorescence est rouge ou violacée sur la craie; elle est

verdâtre sur le sucre, sur certains spaths calcaires cristallisés et sur le grès de Fontainebleau.

Il ne faut pas des batteries très-fortes pour tuer des oiseaux, des lapins, et même des animaux de plus grande taille ; ils tombent subitement, et l'observation anatomique n'a pu découvrir jusqu'à ce jour quels organes sont blessés: cependant, par les convulsions qu'ils éprouvent quand le choc est trop faible pour les foudroyer, on peut juger que le système nerveux est violemment attaqué.

CHAPITRE V.

De la lumière électrique et du mouvement des corps électrisés.

207. *Conditions générales pour que l'électricité donne de la lumière.* — Les plus grandes charges électriques accumulées sur les corps, soit directement, soit par dissimulation, ne donnent jamais aucune apparence lumineuse quand l'équilibre est établi et que le fluide est en repos. Ainsi, la première condition de la lumière électrique est le mouvement des fluides ou la rupture de leur équilibre. Cette condition, toujours nécessaire, n'est pas toujours suffisante; il faut encore que la tension des fluides qui détermine leur mouvement soit une force assez considérable. Par exemple, l'électricité d'une machine ordinaire ne donne point de lumière sensible quand elle s'écoule dans le sol par un fil de métal; tandis qu'une machine puissante peut environner d'une auréole brillante un fil de fer de cinquante pieds de long, communiquant au sol aussi parfaitement qu'il soit possible (Van-Marum, *Description de la grande machine du musée de Teyler*). La tension nécessaire à la production de la lumière est tout-à-fait dépendante de l'état, de la forme, et de la conductibilité du milieu dans lequel les fluides électriques doivent se mouvoir : quelquefois, de faibles tensions donnent une lumière éclatante; d'autres fois, les plus fortes tensions qu'on puisse accumuler ne donnent pas la moindre apparence lumineuse.

208. *Lumière électrique dans l'air et dans les gaz sous la pression de l'atmosphère.* — La distance à laquelle on peut tirer l'étincelle d'un corps électrisé dépend surtout de la conductibilité de sa substance, de l'étendue de sa sur-

face et de l'épaisseur de la couche électrique dont il est chargé ; car, la seule condition pour que l'étincelle parte est que la tension de l'électricité puisse vaincre la pression de l'air. Dans les corps à formes anguleuses, cette condition se trouve remplie, même pour des charges assez faibles, et le fluide se dissipe spontanément, en formant des *aigrettes* de lumière qui brillent dans les ténèbres et dont les traits divergens présentent quelquefois plusieurs pouces de longueur. Dans les corps à formes arrondies, il faut de très-puissantes charges pour que l'étincelle parte d'elle-même ; mais, si on leur présente un conducteur communiquant au sol, il s'exerce à l'instant une action par influence, les fluides se déplacent en vertu de la conductibilité, s'accumulent en raison de l'étendue des surfaces, et l'étincelle jaillit dès que la pression de l'air est vaincue sur l'un ou l'autre des corps qui sont mis en présence. Une machine est très-forte quand elle peut, sans le secours des conducteurs secondaires, donner des étincelles à vingt ou trente pouces. A cette distance, la lumière électrique forme un sillon de feu dont les sinuosités sont tout-à-fait analogues aux zigzags de l'éclair.

Pour multiplier les étincelles que donne une machine, il suffit de multiplier les solutions de continuité du conducteur par lequel le fluide s'écoule dans le sol. C'est sur ce principe que reposent tous les jeux de la lumière électrique.

Avec des *grains* de métal enfilés dans de la soie et maintenus par des nœuds à quelques millimètres de distance, on peut composer des chaînes, des guirlandes ou des dessins, qui paraissent resplendissans de feu pendant tout le temps que l'on tourne la machine avec laquelle ils communiquent : entre le dernier grain et l'avant dernier la lumière paraît au même instant qu'entre le premier et le second, tant est rapide la communication de l'électricité dans toute la longueur de la chaîne.

Les *tubes étincelans* (*fig.* 303) se composent avec de petits

losanges de feuilles d'étain que l'on colle sur le verre en approchant leurs pointes à de très-petites distances l'une de l'autre ; l'étincelle jaillit au même instant entre tous ces losanges, et le tube ou le matras paraît illuminé dans toute sa longueur.

Les *carreaux étincelans* offrent à l'œil des dessins plus fins et plus variés : on les forme en collant sur un carreau de verre ordinaire de petites bandes de feuilles d'étain *bb'*, *cc'*, etc. (*fig.* 302), qui forment un ruban continu, depuis *a* jusqu'à *z*; ensuite, on enlève avec une pointe toutes les parties de ces bandes qui se trouvent sur les contours du dessin que l'on veut rendre visible. Chacune de ces solutions de continuité est marquée par une étincelle lorsqu'on fait passer le fluide de la machine de *z* en *a*, ou de *a* en *z*. On peut de cette manière représenter avec assez de vérité des figures de toute espèce : c'était le grand amusement des électriciens du siècle dernier.

Le *carreau magique* est autrement disposé : l'une de ses faces est recouverte d'une feuille d'étain et l'autre d'une espèce de vernis contenant beaucoup d'*aventurine;* l'électricité s'accumule par dissimulation ; et, quand l'étincelle part, on voit sur la face aventurinée des traits de feu qui serpentent dans tous les sens.

C'est aussi dans l'obscurité qu'il faut étudier les phénomènes des pointes : alors, quand on les met en communication avec les conducteurs d'une forte machine, on aperçoit de brillantes aigrettes, comme celle qui est représentée dans la figure 305; à l'extrémité de la pointe, on ne distingue qu'un seul trait de feu, qui se divise à une petite distance et se ramifie en une foule de petits filets étincelans.

L'électricité résineuse ne donne jamais des aigrettes aussi divergentes et aussi allongées que l'électricité vitrée ; ce phénomène singulier est bien digne d'attention, puisqu'il semble offrir un caractère distinctif entre les deux fluides électriques.

Les pointes qui sont en communication avec le sol donnent aussi des aigrettes, même quand elles se trouvent à plusieurs pieds de distance des corps électrisés.

En tirant des étincelles un peu fortes sur un morceau de drap ou de soie couvert de poussière métallique ou frotté avec des feuilles minces d'or ou d'argent, on observe des effets analogues à ceux du carreau magique. La lumière paraît en mille endroits à la fois, et se ramifie dans tous les sens sur l'étendue de sa surface.

Des pointes de corps conducteurs encore plus fines et plus rapprochées donnent une espèce de *phosphorescence continue* : par exemple, les lames d'or très-minces, collées sur du verre, du cuir ou du bois, paraissent illuminées pendant tout le temps que l'électricité les traverse, et, sur certains corps mauvais conducteurs, la phosphorescence se prolonge pendant plusieurs minutes après le passage du fluide.

Ces apparences lumineuses que nous offre l'électricité des machines sont une imitation très-faible, et cependant très-exacte de plusieurs phénomènes qu'on observe dans le ciel et sur la terre au moment des orages. Elles nous serviront de principes pour expliquer, dans la Météorologie, toutes les formes de la lumière électrique, telles que l'éclair, les langues de feu qui paraissent au sommet des mâts des vaisseaux ou sur les flèches des tours élevées, et une foule d'autres météores qui étaient, pour les anciens, un sujet d'effroi et de superstition.

209. *Lumière électrique dans le vide, dans les vapeurs et dans les gaz raréfiés.* — Un tube de huit ou dix pieds de longueur, dans lequel on a fait le vide, étant mis par l'une de ses extrémités en communication avec une machine ordinaire, et par l'autre en communication avec le sol, on aperçoit tout son intérieur éclairé d'une vive lumière. L'électricité, ne trouvant plus qu'une faible résistance dans l'air qui reste, se dissipe au large dans toute la capacité du tube, et s'écoule en marquant partout son passage par des

traits de feu. Quand les communications sont bien établies, la lumière paraît fixe et uniforme; mais, si à l'extérieur du tube on approche un corps conducteur, elle se porte vers lui et en même temps elle prend plus d'éclat. Il arrive presque toujours qu'un tube qui a servi à ces expériences donne encore des espèces d'éclairs long-temps après avoir été séparé de la machine.

Pour observer les diverses apparences de la lumière électrique suivant les différens degrés de raréfaction de l'air, on emploie l'appareil qui est représenté dans la figure 304; c'est un vase en verre de forme ellipsoïde que l'on appelait autrefois l'*œuf philosophique* : à l'une de ses extrémités, il porte un tube à robinet, et à l'autre une tige à bouton passant dans une boîte à cuir. Quand le vide est fait aussi parfaitement qu'il soit possible, l'électricité passe librement en remplissant de lumière toute la capacité du vase; quand on laisse rentrer un peu d'air, la lumière devient moins diffuse, elle se resserre et forme entre les deux boutons *b* et *b'* des arcs de couleur pourpre; une quantité d'air un peu plus grande donne encore moins de diffusion à la lumière, et ainsi de suite jusqu'au moment où le fluide ne peut plus s'écouler qu'en jaillissant d'un bouton à l'autre sous forme d'étincelles.

Comme avec les meilleures machines nous ne pouvons faire le vide qu'à deux millimètres, il reste encore, dans les expériences précédentes, une quantité d'air qui peut avoir une grande influence et sur la formation de la lumière et sur sa couleur. Le vide barométrique étant le plus parfait que nous puissions obtenir, il est curieux de voir si le passage de l'électricité au travers des vapeurs si rares du mercure produirait encore des phénomènes lumineux. Dès l'an 1660, Picard avait remarqué qu'un baromètre devient lumineux lorsqu'on l'agite dans les ténèbres; plus tard, on a constaté que ce phénomène est dû à l'électricité qui se développe par le frottement du mercure contre les parois

intérieures du tube ; enfin Cavendish imagina de faire un *double baromètre*, de manière que l'électricité donnée à l'une des cuvettes fût obligée de traverser le vide pour aller sortir par l'autre cuvette et s'écouler dans le sol (*fig.* 306). Dans ce vide, plus parfait que les précédens, la matière électrique offre encore les mêmes phénomènes : elle remplit de lumière tout l'espace qu'elle traverse, et l'on reconnaît que des tensions même très-faibles sont suffisantes pour la faire passer du sommet de la première colonne au sommet de la seconde.

Les couleurs de la lumière électrique sont très-changeantes, et les changemens qu'elle présente sont dépendans de la force de l'étincelle et de la pression du gaz qu'elle traverse ; cependant, pour la même force et la même pression, il y a des gaz et des vapeurs qui semblent donner de préférence les teintes rougeâtres, tandis que d'autres donnent les teintes jaunes, bleues ou violacées.

210. *Causes de la lumière électrique.* — Quelques auteurs ont pensé que le fluide électrique, en s'ouvrant de force un passage au travers des corps, les comprimait au point de les rendre lumineux ; ainsi, d'après cette hypothèse, les vapeurs de mercure dans le vide barométrique seraient elles-mêmes comprimées et refoulées avec tant de violence qu'elles dégageraient de la chaleur et de la lumière. Il n'y a point de faits positifs pour démontrer la fausseté de cette opinion, ni même son insuffisance.

Cependant il y a une autre supposition qui est aujourd'hui plus généralement admise et qui nous semble plus vraisemblable ; elle paraît avoir été faite pour la première fois par Ritter, et elle a été depuis développée par un grand nombre de savans, surtout par MM. Davy, OErsted et Berzélius. Elle consiste à regarder tous les atomes de la matière pondérable comme les élémens entre lesquels s'accomplissent toutes les décompositions et toutes les recompositions électriques. Les atomes posséderaient primitivement

l'un des fluides : les uns, que l'on appelle *électro-positifs*, posséderaient primitivement le fluide positif ou vitré; les autres, que l'on appelle *électro-négatifs*, posséderaient primitivement le fluide négatif ou résineux : les premiers, enveloppés de fluide neutre, auraient attiré du fluide négatif, tandis que les derniers, au contraire, auraient attiré du fluide positif; de telle sorte qu'ils seraient l'un et l'autre à l'état naturel. Cela posé, imaginons une seule file d'atomes électro-positifs ou électro-négatifs, et l'un des fluides qui se présente pour la parcourir, il est évident qu'il se manifestera subitement autant de petites étincelles qu'il y a d'atomes, à-peu-près comme il arrive à la chaîne des grains de métal dont nous avons parlé; pour plusieurs fils d'atomes le phénomène serait le même, et dans le vide du double baromètre, les atomes dispersés de la vapeur de mercure seraient la vraie cause de la lumière qu'on observe; enfin, dans le vide absolu, on ne sait ce qui arriverait, car, le fluide neutre étant homogène et sans solutions de continuité, on ne peut rien dire des effets qu'il éprouve, puisqu'on ne sait rien sur le mode d'agrégation des deux fluides qui le constituent.

Bien que cette hypothèse semble appuyée par tous les faits connus, il est bon cependant de la mettre à de nouvelles épreuves et de la regarder plutôt comme un moyen de chercher la vérité que comme la vérité elle-même.

211. *Cause du mouvement des corps non conducteurs électrisés.* — Il ne paraît pas qu'il existe aucune attraction à distance, ni même aucune affinité entre le fluide électrique et la substance des corps non conducteurs, car tous ces corps perdent leur électricité dans le vide. D'après cela, si nous considérons deux balles de gomme laque, par exemple, chargées l'une et l'autre d'une même électricité et mises en présence, la seule force qui les sollicite est la répulsion de toutes les molécules du fluide dont elles sont revêtues; l'effet immédiat de cette force serait donc d'écarter ces molécules, et

de les disperser de toutes parts, si elles pouvaient se mouvoir librement : par exemple, si les deux balles étaient dans le vide, elles resteraient immobiles, tandis que leur électricité, obéissant à sa répulsion propre, se disséminerait jusqu'aux limites de l'espace; mais, suspendues au milieu de l'air qui est un mauvais conducteur, le fluide qui les couvre est arrêté dans tous les sens, ou plutôt, il trouve une résistance à vaincre. Celles de ces molécules qui s'appuient sur l'air ne peuvent se mouvoir sans pousser l'air devant elles, et celles qui s'appuient sur la substance des balles de gomme laque ne peuvent se mouvoir non plus sans les pousser comme un obstacle qui s'oppose à leur marche. C'est par ce double effet que les balles sont mises en mouvement et écartées l'une de l'autre.

Pour rendre le phénomène plus sensible, on pourrait concevoir que les balles de gomme laque, après avoir été électrisées, ont eu leur surface recouverte d'une couche de substance imperméable à l'électricité, de telle sorte que le fluide qui les charge soit comme emprisonné entre ces deux matières non conductrices. Alors il est évident que toutes les actions répulsives qui s'exercent entre les molécules électriques se transmettent immédiatement aux molécules pondérables par le fait seul de la résistance passive qu'elles opposent. La couche d'air qui enveloppe les corps fait précisément l'office de cette couche imperméable à l'électricité.

On prouve, de la même manière, que des balles chargées de fluides contraires doivent être entraînées et attirées par l'effort que font les molécules de ces fluides pour les rejoindre.

Le même raisonnement s'applique à tous les corps non conducteurs, quelle que soit leur forme; et il est visible que si un corps non conducteur, pris dans son état naturel, n'est jamais attiré ni repoussé par un corps électrisé, c'est simplement parce que, ses fluides n'étant point décomposés par influence et séparés l'un de l'autre, il éprouve toujours deux

actions contraires, l'une attractive, et l'autre répulsive, qui sont sans cesse égales et qui se détruisent.

212. *Mouvement des corps conducteurs électrisés.*—Nous avons déjà vu que, dans son état d'équilibre sur un corps conducteur, l'électricité forme une couche d'une certaine épaisseur, ayant deux surfaces, l'une qui s'appuie sur l'air environnant, et l'autre qui est libre dans la substance même du corps. Les molécules de la surface libre ne peuvent jamais à elles seules imprimer aucun mouvement à la matière pondérable, puisqu'elles ont la facilité de se déplacer dans toute la masse sans y éprouver aucune résistance sensible. Tous les mouvemens des corps conducteurs électrisés sont donc le résultat des diverses pressions que le fluide exerce contre l'air, ou, en général, contre les enveloppes imperméables qui limitent leurs surfaces ; car, on peut toujours assimiler l'air qui touche un corps conducteur à une enveloppe imperméable qui ferait corps avec lui. Cela posé, si l'on imagine des sphères conductrices, il est visible que, chargées d'une même électricité, elles se repoussent, surtout par les régions de leurs surfaces les plus éloignées l'une de l'autre ; tandis que, chargées d'électricités contraires, elles s'attirent, surtout par les régions les plus voisines; et ce n'est pas toutefois que les molécules de la surface libre n'aient aucune part au phénomène, car elles sont maintenues au lieu qu'elles occupent par des forces ou des répulsions contraires qui prennent leur appui contre la couche d'air environnante.

Un corps conducteur, à l'état naturel, est toujours attiré par un corps électrisé, parce que ses fluides étant séparés par influence, et celui de noms contraires étant toujours appelé dans la région la plus voisine, l'attraction qui s'exerce sur lui est toujours plus efficace que la répulsion qui s'exerce sur l'autre à une distance plus grande.

213. *Mouvemens produits par l'écoulement de l'électricité.* — Sur un pivot conducteur *cp*, communiquant à la machine (*fig.* 313), on pose en équilibre une petite tige de métal *tt'*,

dont les deux bouts sont aiguisés et recourbés en sens contraire, et, dès qu'on tourne la machine, cet appareil, que l'on appelle le *tourniquet électrique*, prend un mouvement de rotation très-rapide, comme si les extrémités des pointes étaient vivement repoussées. Le même phénomène se produit sur des tourniquets à plusieurs tiges, et, lorsqu'on est dans les ténèbres, on observe pendant le mouvement des aigrettes de feu qui s'élancent de chaque pointe. L'électricité résineuse et la vitrée présentent une différence à l'égard de la lumière, mais elles n'en présentent aucune à l'égard du mouvement. Cette rotation curieuse s'explique de la manière suivante :

Le fluide électrique, répandu partout sur la surface des tiges du tourniquet, exerce partout une pression sur l'air environnant, comme l'eau et les autres fluides pondérables pressent, dans tous les points, les parois des vases qui les contiennent. Si le fluide électrique ne trouvait point d'issue, les pressions opposées seraient toujours égales, et l'appareil resterait au repos : mais, dès qu'il s'écoule par une pointe, il n'exerce plus de pression sur l'orifice de l'écoulement, et la pression qui s'exerce au point opposé détermine le mouvement par un véritable *recul*, tout-à-fait pareil à celui qui s'exerce dans le tourniquet à gaz ou dans le tourniquet hydraulique.

214. *Mouvemens produits par une décomposition instantanée.* — Concevons une sphère conductrice, de cuivre par exemple, communiquant au sol par un fil très-fin, et posée sur un plan non conducteur indéfini, où elle n'est retenue que par son poids; imaginons qu'au-dessus d'elle, à une certaine distance, on dispose un corps capable de recevoir ou de conserver les plus fortes charges électriques. Il est évident que, si la sphère est très-petite, elle sera emportée par l'attraction qu'elle éprouve, et viendra de bas en haut, malgré son poids, se précipiter sur le corps qui la sollicite par influence. Mais il est évident aussi que, son diamètre et son

poids augmentant, il arrivera une certaine limite où la puissance électrique sera tout-à-fait insuffisante pour la soulever: l'étincelle partira entre elle et le corps électrisé qui la sollicite sans qu'elle en reçoive le moindre mouvement, à-peu-près comme l'étincelle part des conducteurs de la machine sans qu'ils soient entraînés et arrachés de leurs supports.

Cependant, on observe des effets de la foudre qui semblent contraires à ce principe: on a vu souvent de grandes masses transportées à plusieurs centaines de pas, et surtout des pièces de métal arrachées de leurs scellemens par un effort équivalent à plusieurs milliers de kilogrammes. Ces phénomènes me paraissent dépendre d'une différence dans la décomposition des fluides naturels par des actions lentes, ou par des actions subites. Dans le premier cas, la conductibilité suffit au déplacement des fluides, et ils ont le temps de se transporter et de s'arranger à la surface, où ils exercent contre l'air une pression qui est bientôt capable de le repousser : dans le second cas, tous les atomes de la masse éprouvent, simultanément et subitement, une décomposition de leurs fluides naturels; ils sont saisis avec tant de violence que l'arrangement voulu par les lois de l'équilibre n'a pas le temps de s'accomplir, et les masses sont ainsi entraînées par des forces incomparablement plus grandes que celles qui pourraient trouver leur point d'appui contre l'air.

CHAPITRE VI.

Electricité développée par la pression et par la chaleur.

215. Nous avons vu que deux surfaces quelconques s'électrisent par le frottement, l'une prenant le fluide vitré et l'autre le résineux; nous avons vu pareillement que la tension de l'électricité qui se développe dans ces circonstances dépend de la nature des corps, de l'état de leur surface, et de leur température. Mais, cette cause mécanique n'est pas la seule qui puisse décomposer ou séparer les fluides : sous certaines conditions, les changemens de précision et de température peuvent aussi développer de l'électricité.

216. *Développement de l'électricité par pression.* — On pose un disque de métal sur un taffetas gommé ; on le relève ensuite, au moyen d'un manche isolant, après l'avoir un peu pressé, et l'on trouve de l'électricité résineuse sur ce disque, et de la vitrée sur le taffetas. Cette expérience, que l'on doit à M. Libes, n'offre pas un caractère décisif: l'adhérence qui s'établit entre la surface du métal et la surface visqueuse du vernis produit un effet assez analogue au frottement. Mais M. Haüy est parvenu à développer de l'électricité dans un grand nombre de corps à surfaces lisses et polies, et dans de telles circonstances que le phénomène est bien certainement dû à la pression et non pas au frottement. Par exemple, un fragment de spath calcaire, à faces parallèles, étant pressé pendant un instant entre les doigts, acquiert une charge très-sensible d'électricité vitrée ; il en est de même de la topaze, de la chaux fluatée, du mica, de l'arragonite, du quartz, et de plusieurs autres substances : toutefois, l'espèce d'électricité qu'elles prennent dépend de la nature du corps qui les presse. M. Haüy a découvert

en même temps une propriété très-curieuse des cristaux électriques par pression : c'est la faculté qu'ils ont de conserver leur électricité pendant plusieurs heures et quelquefois même pendant plusieurs jours. La chaux carbonatée est, sous ce rapport, la substance la plus remarquable : elle possède une telle *force conservatrice*, qu'après avoir été pressée un instant, elle donne encore, au bout de *onze* jours, des signes électriques sensibles (*Annales de Physiq. et de Chimie*, tome 5). C'est sur cette propriété que repose la construction de l'aiguille électrique de M. Haüy, représentée dans la figure 314 ; elle ressemble à l'aiguille ordinaire, avec cette seule différence, qu'à l'une des extrémités, au lieu d'un petit globule de métal, se trouve adaptée une petite lame de chaux carbonatée *cc'*, que l'on électrise en la pressant entre les doigts ; cet électroscope, conservant très-bien sa force primitive, est un des plus simples et des plus commodes pour comparer approximativement les tensions électriques des différens corps qu'on lui présente. Ainsi, la faculté de développer de l'électricité par une pression donnée, celle de prendre tel ou tel fluide, et celle de le conserver plus ou moins long-temps, sont autant de caractères qui peuvent servir à distinguer et à classer les cristaux.

217. *Des électricités produites par la chaleur.* — La tourmaline a la propriété d'attirer et de repousser les corps légers : dans les Indes, et surtout à Ceylan, où cette pierre est très-commune, on s'amuse de cette propriété depuis bien des siècles, à-peu-près comme au temps de Platon les Grecs s'amusaient des attractions de l'aimant. Un phénomène aussi curieux ne pouvait échapper à l'attention des voyageurs ou même des commerçans. Les Hollandais firent connaître les tourmalines en Europe, et, depuis une centaine d'années, les propriétés électriques dont elles jouissent exercent la sagacité des physiciens. Voici les résultats généraux qui ont été découverts et constatés par Canton, Wilson, Priestley, Bergmann, Æpinus et Haüy.

1° Quand une tourmaline est électrique, elle présente toujours vers les extrémités de son axe deux *pôles contraires*, l'un agissant par du fluide vitré, et l'autre par du fluide résineux : sa région moyenne ne donne aucun signe d'électricité. Les fluides électriques qui se développent dans la tourmaline sont donc distribués à-peu-près comme les fluides magnétiques, qui deviennent libres dans un aimant cylindrique ou prismatique.

2° Une tourmaline étant brisée transversalement pendant qu'elle est électrique, chacun de ses fragmens offre deux pôles, disposés dans le même sens que les pôles primitifs ; autre analogie remarquable entre le fluide électrique des tourmalines et le fluide magnétique des aimans.

Il était nécessaire d'énoncer ces deux lois générales de la distribution des fluides dans les tourmalines, pour comprendre les conditions du développement de l'électricité et les singularités qu'elles présentent.

3° Pour chaque tourmaline, il y a deux limites de température entre lesquelles sont compris tous les phénomènes électriques ; au-dessus de la limite supérieure et au-dessous de la limite inférieure, la tourmaline se comporte comme les autres corps, et ne manifeste plus d'*électricité polaire*. Ces limites paraissent être souvent 10° et 150° ; elles sont en général peu différentes pour des tourmalines de même dimension, mais elles varient avec la longueur.

4° Entre ces limites, quand on chauffe une tourmaline régulièrement, c'est-à-dire de manière qu'elle éprouve à-peu-près les mêmes accroissemens de chaleur sur tous les points de sa surface, ses pôles électriques commencent à paraître, le vitré à un bout, le résineux à l'autre, et ils restent ainsi durant tout le temps que la température *change* et *s'élève*.

5° Une tourmaline ayant ses pôles par échauffement, si on la refroidit régulièrement, ses pôles disparaissent un instant pour reparaître ensuite, mais, en changeant de posi-

tion, le vitré prenant la place du résineux *et vice versâ*, et ces pôles, par *refroidissement*, inverses des premiers, se maintiennent pendant tout le temps que la température *change* et *s'abaisse*.

6°. La vertu polaire semble dépendre du *changement* de température, de telle sorte qu'à une température donnée, une tourmaline peut se présenter dans trois états différens, savoir : à l'état naturel, si elle a été maintenue long-temps à cette température ; avec ses pôles par échauffement, si elle y arrive en s'échauffant ; avec ses pôles par refroidissement, si elle y arrive en se refroidissant.

7° M. Haüy a quelquefois remarqué un renversement des pôles pendant l'élévation de température, et un renversement contraire pendant le refroidissement : ce phénomène qui ne se produit pas toujours, pourrait dépendre d'une différence de température entre les couches de la surface et les couches centrales.

8° Une tourmaline, chauffée ou refroidie par une de ses extrémités seulement, paraît, pendant quelques instans, ne posséder qu'une seule électricité dans toute sa longueur ; mais, comme on voit toujours les deux électricités se développer en même temps dans tous les autres phénomènes électriques, quels qu'ils soient, il est naturel de supposer que dans ce cas, exceptionnel en apparence, les deux fluides s'y trouvent encore, inégalement distribués dans la longueur ou dans l'épaisseur de la tourmaline, et par conséquent inégalement perceptibles.

Pour vérifier toutes ces lois de l'électricité de la tourmaline, quelques observateurs, comme Priestley, la faisaient chauffer et refroidir pendant qu'elle était suspendue à un fil de coton, et M. Haüy la posait sur un petit appareil représenté dans la figure 312.

Il existe un grand nombre de cristaux qui offrent des propriétés électriques analogues à celles de la tourmaline.

TROISIÈME SECTION.

DU GALVANISME.

CHAPITRE PREMIER.

De l'électricité développée par le contact.

218. *Découverte du galvanisme.* — En 1789, Galvani, médecin et professeur à Bologne, observa un phénomène singulier : ayant eu l'occasion de préparer des grenouilles pour divers sujets de recherches, il les suspendit par hasard à un balcon de fer par de petits crochets de cuivre qui passaient entre les nerfs lombaires et la colonne dorsale ; disposées ainsi, ces grenouilles, mortes et mutilées, éprouvaient de vives convulsions. Un observateur vulgaire aurait pu remarquer le fait, mais il en aurait facilement imaginé quelque explication spécieuse, et son esprit satisfait se serait occupé d'autre chose. Galvani fut moins prompt dans ses jugemens : doué d'une attention pénétrante et d'une rare sagacité, il saisit dans ce phénomène un principe nouveau, et en fit sortir cette branche féconde de la physique qui est maintenant connue sous le nom de *Galvani sme.* Il reconnut d'abord que les grenouilles, coupées, dépouillées et suspendues, comme nous l'avons dit, n'éprouvent pas des convulsions permanentes : pour que leurs membres s'agitent, il faut ou que le vent, ou quelque autre cause accidentelle, vienne mettre leurs muscles en contact avec la tige de fer qui porte le crochet de cuivre. Cette condition est indis-

pensable, et l'on peut s'en assurer par l'expérience : pour cela, on coupe une grenouille vivante, on la dépouille rapidement, et, passant la pointe des ciseaux sous les deux nerfs lombaires qui paraissent comme des fils blancs de chaque côté de la colonne vertébrale, on enlève, en deux coups, les deux ou trois vertèbres inférieures; ainsi, les nerfs lombaires sont mis à nu, et forment la seule attache qui lie encore les membres inférieurs aux vertèbres supérieures; un fil de cuivre, qui passe entre les deux nerfs et qui les touche, va s'accrocher à un fil de fer recourbé et assez long pour venir toucher les jointures ou les muscles. A chaque contact, les jambes se replient et s'agitent, et cette moitié de grenouille morte semble reprendre vie pour sauter. Ces effets peuvent se reproduire encore au bout de quelques heures, mais le plus souvent les convulsions s'affaiblissent assez promptement, et, après 20 ou 30 minutes, on n'observe plus que de légères palpitations dans la fibre des muscles.

Voilà donc un fait régulier, constant et bien caractérisé, dont on connaît les conditions, et qui peut se reproduire à volonté. C'est en établissant ce point fondamental que Galvani a ouvert une nouvelle carrière, et distingué les commotions dont il s'agit de ces mouvemens vagues et convulsifs que l'on observe souvent dans les insectes, les reptiles et les poissons, long-temps après les diverses mutilations qu'on leur a fait subir. Préoccupé de quelque système sur un fluide nerveux ou sur un fluide vital, Galvani ne tarda pas à imaginer une explication du phénomène, qui fut en rapport avec ses idées du moment : les commotions de la grenouille, dit-il, sont excitées par un fluide qui passe des nerfs aux muscles, au moyen de la communication extérieure que l'on établit entre eux; ce fluide existe dans les nerfs, il traverse l'arc conducteur, c'est-à-dire le crochet de cuivre et la tige de fer, et vient à l'instant du contact se précipiter sur les muscles, et les contracter à-peu-près comme ferait une décharge électrique.

Ce fluide nouveau fut appelé *fluide galvanique*, et les corps organisés furent considérés, par rapport à ce fluide, comme une espèce de bouteille de Leyde dont les muscles et les nerfs étaient les deux armatures.

Le bruit de cette découverte se répandit bientôt en Allemagne, en France et en Angleterre; partout on s'empressait de répéter, de varier les expériences; le phénomène lui-même excitait une grande admiration; mais l'espérance de saisir, dans les corps animés, un fluide subtil, un principe de vie, donnait encore une nouvelle ardeur à l'active curiosité des savans. D'ailleurs, ces idées paraissaient à une époque de grandes découvertes et de grandes réformes; tous les esprits étaient en mouvement et comme emportés par l'attrait de la nouveauté.

On reconnut bientôt une analogie remarquable entre le fluide galvanique et le fluide électrique : c'est qu'on n'obtient jamais de commotions dans les grenouilles lorsqu'on établit la communication entre les nerfs et les muscles au moyen des corps mauvais conducteurs de l'électricité. En même temps, le phénomène prit une vaste extension, car on découvrit qu'il se manifestait dans la plupart des corps vivans. Souvent même il n'est pas nécessaire de dénuder ni les muscles ni les nerfs pour obtenir un effet très-marqué. Ainsi, une pièce de cuivre étant posée sur la langue et une pièce de fer dessous, on éprouve une contraction et une saveur acide ou alcaline à l'instant où les deux pièces se touchent; il se trouve même des personnes assez sensibles pour apercevoir alors une lueur qui passe devant les yeux.

Toute hypothèse est bonne quand elle fait faire des découvertes, et l'hypothèse de Galvani eut son moment de succès : mais, pour la rendre féconde, il fallait admettre des considérations vagues, des données incertaines; il fallait se jeter dans des questions compliquées sur les fonctions vitales et sur les mystères de l'organisation. Ces questions, sans cesse agitées parmi les hommes, et toujours insolubles, com-

mençaient à reprendre vogue; les meilleurs esprits s'y laissaient entraîner; et l'on ne sait combien de fausses routes auraient été ouvertes à l'esprit humain, ni avec quelle ardeur on s'y serait jeté, si un homme d'un génie hardi n'eût mis un terme à toutes ces vaines tentatives. Cet homme fut Volta. Déjà célèbre par plusieurs découvertes ingénieuses sur l'électricité, Volta, professeur à Pavie, répétait, avec une inquiète attention, toutes les expériences de Galvani et de ses disciples : plein d'enthousiasme pour les faits, il ne donnait qu'une adhésion conditionnelle aux hypothèses ; enfin, il saisit, avec une admirable sagacité, une condition du phénomène dont l'importance avait échappé jusque-là aux plus habiles observateurs. Quand l'arc conducteur, qui établit la communication entre les muscles et les nerfs, est d'un seul métal, la contraction est toujours peu sensible : au contraire, elle est toujours vive et forte quand l'arc conducteur est composé de deux métaux. L'expérience en est représentée dans la figure 335 : la partie *z* de l'arc est de zinc, et l'autre *c* est de cuivre; il importe que les métaux soient nets et bien décapés au point où ils touchent la grenouille et surtout au point où ils se touchent entre eux. Cette condition posée, Volta en tire la conséquence suivante : Il est vrai, dit-il, qu'il y a du fluide en jeu dans cette expérience : mais, la grenouille n'est pas une bouteille de Leyde; le fluide qui l'agite n'est point dans ses muscles ni dans ses nerfs, il est dans les métaux; il se développe par leur contact, et il n'est autre chose que du fluide électrique ordinaire. Une idée aussi contraire à tout ce que l'on connaissait alors sur les propriétés électriques et sur la conductibilité des métaux, ne pouvait être admise sans opposition; il est vrai que l'hypothèse de Galvani était épuisée; elle ne produisait plus de faits nouveaux, mais elle avait l'avantage d'expliquer tous les faits connus, et d'établir entre eux une liaison séduisante. Les opinions furent partagées. A quoi servent les deux métaux, disaient les partisans de Galvani,

si ce n'est à établir une communication plus complète entre les muscles et les nerfs, et à donner au fluide un écoulement plus libre ? A quoi pourraient-ils servir, répondaient les partisans de Volta, s'il n'y avait qu'une communication à établir ; un seul métal ne serait-il pas suffisant ? Et, de part et d'autre, on tentait des expériences nouvelles, autant peut-être pour soutenir l'opinion qu'on avait adoptée que pour la mettre à l'épreuve : car, il y a aussi dans les discussions scientifiques une sorte de conviction prématurée, à laquelle on se laisse trop souvent entraîner. Galvani, sans nier l'efficacité des deux métaux, essayait de démontrer qu'un seul métal excite des contractions : et, en effet, une grenouille, préparée et jetée sur un bain de mercure, éprouve des palpitations très-sensibles; elle en éprouve pareillement lorsqu'on touche à la fois les muscles et les nerfs avec du plomb très pur ou avec un autre métal dans lequel l'analyse chimique ne découvre rien d'étranger. Loin de contester ces phénomènes, Volta les annonçait lui-même, et il en tirait des preuves à l'appui de son opinion. Il est vrai qu'un seul métal agit; mais, frottez-en l'extrémité sur un autre métal, il agira encore avec beaucoup plus d'énergie. Les parcelles imperceptibles qui s'y attachent lui donnent une hétérogénéité suffisante; c'est au contact du métal et de ces parcelles étrangères que l'électricité se développe. Ce qui est homogène pour l'analyse chimique n'est point homogène absolument; et, d'ailleurs, si l'art ou la nature pouvaient nous donner un métal d'une pureté parfaite, ce métal agirait encore; dès qu'il touche les muscles ou les nerfs, il y a hétérogénéité aux points de contact, et par conséquent de l'électricité produite. Enfin, la substance des muscles et celle des nerfs sont assez différentes entre elles pour donner de l'électricité quand elles se touchent; et, en effet, en repliant les muscles cruraux sur les nerfs lombaires, on obtient des palpitations sensibles, surtout si la grenouille est très-vive et très-rapidement préparée.

219. *Preuves directes du développement de l'électricité par le contact.* — L'idée du développement de l'électricité au contact des corps hétérogènes ne s'accréditait que lentement, la sévérité des théories physiques en réclamait des preuves encore plus directes et plus décisives, et Volta ne fut pas long-temps à les produire. Un appareil qu'il avait inventé quelques années auparavant lui en fournit les moyens : c'est le condensateur que nous avons décrit précédemment, et qui est représenté (*figure* 320).

L'expérience se fait de la manière suivante : après s'être assuré que le condensateur garde bien le fluide qu'on lui donne, et après l'avoir remis à l'état naturel, on établit, avec les doigts mouillés, une communication entre son plateau supérieur et le sol ; en même temps une plaque de zinc, communiquant pareillement au sol, est mise en contact avec le plateau inférieur; un seul instant suffit, on rompt les communications, on enlève le disque supérieur, et l'on observe une divergence sensible dans les lames d'or. D'où vient cette électricité ? Il est évident qu'elle n'a pu être développée qu'au contact du cuivre avec la lame de zinc ; c'est là qu'une force particulière a exercé son action pour séparer les fluides naturels et pour les mettre en mouvement : le fluide vitré qu'elle a fait passer sur le zinc s'est écoulé dans le sol ; le fluide résineux qu'elle a poussé sur le cuivre du plateau inférieur s'y est accumulé par dissimulation, en agissant sur les fluides naturels du plateau supérieur; et, ce plateau étant enlevé, toute l'électricité résineuse, dissimulée dans le plateau inférieur, se répand librement, passe dans les lames et produit la divergence qu'on y observe.

En substituant à la lame de zinc une lame de même métal que le plateau, nul effet n'est produit. Mais tous les autres métaux produisent une divergence dans les lames : le plomb, l'étain, le fer, le bismuth et l'antimoine, prennent, comme le zinc, l'électricité vitrée et donnent au plateau une charge résineuse : tandis que l'or, l'argent, le palladium et le pla-

tine, produisent un effet contraire ; ils prennent une charge résineuse, et donnent au cuivre du plateau une charge vitrée. Ces expériences sont décisives, mais elles ne donnent pas encore, de la force qui développe l'électricité, l'idée complète que l'on doit en avoir, car, on pourrait supposer qu'elle agit seulement à l'instant du contact, et qu'elle dérive peut-être du frottement ou de la pression qui s'exerce alors entre les surfaces métalliques. Pour lever tous les doutes à cet égard, Volta eut l'ingénieuse idée de faire une *plaque double* (*figure* 336), dont les deux moitiés, l'une en zinc et l'autre en cuivre, se trouvent soudées à la jonction *ss'*. Or, en prenant à la main le zinc de cette plaque, et en touchant avec son cuivre le plateau inférieur du condensateur tandis que le plateau supérieur communique au sol, on obtient la même divergence dans les lames que si le zinc eût immédiatement touché le cuivre du plateau. Donc, dans la plaque double, après des années de contact, la force agit encore entre le zinc et le cuivre comme si ces deux métaux venaient de se toucher à l'instant.

220. *De la force électromotrice.* — Cette force nouvelle, qui s'exerce entre les substances hétérogènes, est ce qu'on appelle la *force électromotrice* ; elle naît du contact, elle réside à la surface de jonction, et là, elle agit pour décomposer l'électricité naturelle, séparant sans cesse les deux fluides, faisant passer le vitré sur l'un des corps et le résineux sur l'autre. Ainsi, la plaque double (*fig.* 336) étant isolée, il est impossible qu'elle soit jamais à l'état naturel.

Voici les principaux caractères de cette force :

Elle produit la décomposition des fluides naturels et empêche leur recomposition : par le premier effet, le fluide vitré est poussé sur le zinc, et se disperse sur toute son étendue en vertu de sa répulsion propre, tandis que le fluide résineux est pareillement poussé et dispersé sur le cuivre ; par le second effet, ces fluides contraires sont maintenus en présence, l'un à droite, l'autre à gauche de la surface de contact, sans pouvoir franchir cette surface et se recomposer en vertu de

leur attraction mutuelle. Pour avoir une idée plus précise de cette résistance, on peut concevoir un moment qu'il n'y ait pas de décomposition au contact, et que l'on donne artificiellement un peu de fluide vitré au zinc; alors, ce fluide ne passerait point sur le cuivre, la force électromotrice serait comme un obstacle capable de l'arrêter.

Comme obstacle à la recomposition, la force électromotrice a une limite; c'est-à-dire qu'elle n'est pas capable d'arrêter des charges quelconques de fluide vitré sur le zinc, ou de fluide résineux sur le cuivre. Dès que ces charges, acquises naturellement par le contact ou données artificiellement, atteignent une certaine tension, elles peuvent franchir la surface de jonction pour se répandre au large ou pour se recombiner; mais, dans ce cas, la force électromotrice arrête encore tout ce qu'elle peut arrêter. On admet qu'en représentant en général par $+t$ la tension du fluide vitré qui se trouve sur le zinc, et par $-t'$ la tension du fluide résineux qui se trouve sur le cuivre, la différence $t+t'$ des deux tensions est une quantité constante, quelles que soient les charges de fluide vitré ou résineux. Si le cuivre était chargé de vitré comme le zinc, sa tension serait alors représentée par $+t'$, et la différence $t-t'$ serait encore la même. C'est cette différence des deux tensions que l'on appelle *tension maximum*, parce qu'elle est en effet le maximum de ce que la force électromotrice peut arrêter et retenir pour empêcher l'équilibre ordinaire.

Comme cause de décomposition, la force électromotrice est instantanée et permanente : permanente, parce qu'elle est toujours prête à agir dès que la tension n'est pas ce qu'elle doit être pour l'équilibre galvanique; et instantanée, parce qu'il ne lui faut qu'un instant inappréciable pour porter cette tension à son maximum. On reconnaît que cette tension est très-faible, parce qu'une lame de zinc ne charge pas le condensateur lorsqu'elle est isolée, tandis qu'elle le charge en un instant lorsqu'elle communique au sol.

Les tensions électriques, développées et retenues par la

force électromotrice, ne sont pas les mêmes au contact de tous les corps. Les métaux sont bons *électromoteurs*, bien que l'on observe entre eux des différences très-marquées ; et l'on dit, en général, que les autres substances ne sont point électromotrices, parce qu'en effet elles ne produisent, au moyen du condensateur, que des résultats insensibles : mais, lorsqu'on les éprouve avec des instrumens plus délicats, on reconnaît qu'elles développent aussi l'électricité par le contact ; seulement, les tensions qu'elles produisent sont incomparablement plus faibles que celles des métaux.

Ainsi, la force électromotrice découverte par Volta est une force universelle qui s'exerce au contact de toutes les molécules des substances hétérogènes, qui décompose sans cesse les fluides électriques, et qui donne naissance à des forces nouvelles dont les effets se font sentir à la matière pondérable. Or, les élémens qui composent la terre, soit à sa surface soit à diverses profondeurs, sont mêlés et confondus de telle sorte qu'il y a partout hétérogénéité entre les parcelles qui se touchent : combien de substances diverses sont mises en contact dans les plus petits des êtres organisés, et combien de réactions électriques s'y doivent développer! La terre végétale, les pierres, les roches, les laves, les couches géologiques, sont-elles autre chose qu'une agrégation de principes différens entre lesquels la force électromotrice doit agir aussi avec plus ou moins d'intensité ? On aperçoit, d'une seule vue, tout ce qu'il y a de fécond dans cette découverte, et nous verrons que les premiers observateurs n'ont pas été trompés dans leurs espérances, quand ils ont cru que les principes du galvanisme deviendraient la clef d'une foule de phénomènes.

CHAPITRE II.

De la pile de Volta.

221. *Principes sur lesquels repose la construction de la pile.* — La pile se construit avec trois corps différens : deux sont métalliques et bons électromoteurs; et le troisième est non métallique, bon conducteur, et très-faiblement électromoteur.

Les métaux qu'on emploie avec le plus d'avantage sont le zinc et le cuivre: le premier forme les *élémens positifs* de la pile, le deuxième les *élémens négatifs ;* deux élémens réunis ou soudés ensemble, l'un positif et l'autre négatif, composent ce qu'on appelle *une paire* ou *un couple.*

Le corps non métallique est ce qu'on appelle le *conducteur* : tantôt c'est une *rondelle humide,* c'est-à-dire une rondelle de drap ou de carton imbibée d'eau pure ou de quelque dissolution acide, alcaline ou saline; tantôt c'est la dissolution elle-même; d'autres fois c'est un corps sec, et alors la pile est ce que l'on appelle une *pile sèche.*

Concevons une plaque de cuivre, ou un élément négatif, communiquant au sol par le fil conducteur non métallique représenté par *f* (*fig.* 337); sur sa surface supérieure posons une plaque de zinc de même dimension : à l'instant du contact, la force électromotrice exerce son action; le fluide résineux qu'elle développe passe sur le cuivre, et s'écoule dans le sol; le fluide vitré, au contraire, passe sur le zinc et s'y accumule jusqu'à ce qu'il ait acquis la tension maximum que la force électromotrice est capable de retenir, il ne faut pour cela qu'un moment inappréciable; cette tension, ou plutôt l'épaisseur électrique qui la produit, étant prise pour unité,

nous dirons que le cuivre est à l'état naturel, tandis que le zinc est couvert d'une épaisseur 1 d'électricité vitrée. Si par quelque moyen nous allions enlever au zinc une partie du fluide qui le couvre, il n'aurait plus l'épaisseur 1 qu'il doit avoir: la force électromotrice le reproduirait à l'instant par un nouveau développement qui réparerait exactement la perte, et par un égal développement de résineux qui s'écoulerait dans le sol. A chaque portion de fluide que l'on viendrait de la sorte enlever au zinc, il y aurait une réparation subite pour reproduire sans cesse l'épaisseur 1, qui est l'état de l'équilibre galvanique; et, si l'on établissait par exemple la communication du zinc avec le sol par un fil *non métallique*, son fluide vitré s'écoulerait sans cesse, et serait sans cesse réparé; en même temps le fluide résineux développé sur le cuivre s'écoulerait de même : tellement que, si l'on approchait l'un de l'autre les deux fils non métalliques qui touchent le zinc et le cuivre, les fluides se recomposeraient à leur point de contact, et l'on aurait *une circulation* électrique continue; les fluides seraient séparés au contact des métaux, et recomposés au contact des fils conducteurs non électromoteurs qui communiquent avec eux.

Cela posé, laissons le cuivre seulement communiquer au sol, et sur le zinc plaçons une rondelle humide : il est évident qu'elle partagera l'électricité vitrée du zinc, mais que, la perte étant réparée à l'instant, l'épaisseur sera 1 sur la rondelle et sur le zinc, comme elle était d'abord.

Il en sera de même encore si nous posons une plaque de cuivre sur la rondelle humide, puisqu'il n'y a point de force électromotrice entre ces corps.

Mais si nous posons une deuxième plaque de zinc sur cette deuxième plaque de cuivre, le phénomène sera plus compliqué, et c'est ici que se montre le véritable principe de l'accumulation de l'électricité dans la pile. Supposons pour un moment que l'action de la force électromotrice soit suspendue dans ce deuxième couple : alors, il est évident que le

zinc prendrait une épaisseur 1 de fluide vitré, comme l'ont fait la rondelle humide et la plaque de cuivre, et, dès que la force électromotrice agira, cette épaisseur deviendra égale à 2 sur ce deuxième zinc, puisqu'elle doit toujours excéder de 1 celle du cuivre avec lequel il est en contact ; en même temps le fluide résineux qui sera développé sur le cuivre sera détruit par le fluide vitré qui s'y trouve, et il se fera dans le premier couple un nouveau développement par lequel le 1er zinc sera ramené à une épaisseur 1, ainsi que la rondelle humide et le 2e cuivre. Au moyen de cet arrangement, le 2e zinc doit donc avoir pour son équilibre une épaisseur de fluide vitré double de celle qui se trouve sur le premier.

On voit que par le même principe la 2e rondelle humide et le 3e cuivre auront la même épaisseur 2, tandis que le 3e zinc aura une épaisseur 3, le 4e zinc aura une épaisseur 4, le 5e une épaisseur 5, etc.... ; le 10e une épaisseur 10.... ; le 100e une épaisseur 100.... ; et le 1000e une épaisseur 1000.

Ainsi, rien ne limite l'épaisseur électrique que l'on peut accumuler au sommet d'une semblable pile, puisque rien ne limite le nombre des élémens que l'on peut superposer ; et le 1er zinc étant, comme nous avons vu, une source inépuisable d'électricité vitrée dont l'épaisseur est 1, le 1000e zinc est une source inépuisable dont l'épaisseur se trouve égale à 1000. Telle est l'admirable invention au moyen de laquelle Volta est parvenu à développer et accumuler une épaisseur électrique indéfiniment croissante sans frottement ni pression, et par la seule puissance du contact de certains corps disposés dans un ordre déterminé. La pile que nous venons de construire est nommée *pile à colonne* ; nous continuerons de nous en servir pour démontrer plusieurs propriétés remarquables qui sont communes à toutes les piles dont nous verrons plus loin la construction.

222. *De la pile isolée.* — L'extrémité de la pile qui se termine par une plaque de zinc s'appelle *l'extrémité zinc*,

l'extrémité positive, ou *le pôle positif* : celle qui se termine par le cuivre s'appelle *l'extrémité cuivre*, *l'extrémité négative* ou *le pôle négatif*. Dans la disposition dont nous venons de parler, le pôle négatif communiquait au sol, le pôle positif était isolé, et, sur toute la pile, il y avait du fluide vitré dont l'épaisseur allait croissant, depuis le premier zinc où elle était 1 jusqu'au 100e zinc où elle était 100, en supposant que la pile eût cent couples. Concevons une autre pile toute pareille, avec cette seule différence que le pôle positif communique au sol, tandis que le pôle négatif reste isolé : il est évident qu'il y aura partout du fluide résineux dont l'épaisseur ira croissant, depuis le 1er cuivre (c'est-à-dire celui qui touche le zinc communiquant au sol) où elle sera 1 jusqu'au 100e cuivre où elle sera 100. Et si, maintenant, nous mettons ces deux piles bout à bout, en interposant seulement une rondelle humide entre les deux pôles qui communiquaient au sol, nous n'aurons qu'une seule pile de 200 couples, dont chaque moitié conservera l'équilibre électrique qu'elle avait d'abord : ainsi, le milieu sera à l'état naturel, même après avoir supprimé les fils de communication ; à partir de là on aura d'un côté de l'électricité vitrée, de l'autre de l'électricité résineuse ; ces électricités ne pourront pas se rejoindre, et leurs épaisseurs, toujours croissantes par différences égales pour chaque couple, seront 100 à chaque pôle. Si l'on vient ensuite à troubler cet équilibre en prenant de l'électricité à l'un des pôles, le *zéro*, ou le point qui est à l'état naturel, se déplacera pour un instant ; le pôle touché aura une épaisseur moindre que 100, et l'autre une épaisseur plus grande ; mais bientôt la perte par l'air diminuant plus rapidement l'épaisseur électrique du pôle le plus fort, le zéro reviendra au milieu et l'équilibre sera rétabli. Ainsi, dans toute pile isolée, l'arrangement définitif de l'électricité est tel que le milieu est à l'état naturel tandis que les deux moitiés sont chargées de fluides contraires, l'épaisseur de ces fluides augmentant de 1,

en passant d'un couple au suivant. Ces résultats peuvent être facilement vérifiés par l'expérience, au moyen d'un condensateur à taffetas et d'un électroscope à balle de sureau.

223. *De la pile en activité.* — Les pôles de la pile isolée étant des sources *indéfinies* d'électricités contraires, il est évident que, si l'on met chacun d'eux en communication avec un fil de métal, le fil partagera le fluide du pôle qu'il touche; et l'on aura ainsi deux conducteurs, l'un positif, l'autre négatif, qui, étant mis en présence, devront donner une recomposition *continuelle.* C'est en effet ce que représente la figure 338 : les deux fils (que l'on nomme aussi quelquefois *les deux pôles* de la pile) étant approchés à une petite distance, on voit jaillir une étincelle, une autre la suit de près, puis une autre, et ainsi de suite : c'est un courant de feu continu, c'est une batterie inépuisable qui se décharge toujours sans être jamais déchargée.

Lorsqu'on met les fils conducteurs en contact immédiat, et que l'on ferme ainsi le circuit de la pile, les étincelles disparaissent, mais tous les effets électriques ne sont pas détruits : les fluides se développent encore dans tous les couples, entre tous les élémens, et ne cessent de venir se recomposer dans tous les points des fils conducteurs qui rejoignent les deux pôles de la pile. Ainsi, au-dehors, tout paraît immobile; et, au-dedans, tout est en activité et en mouvement. Une des preuves les plus frappantes de cette rapide circulation de l'électricité est le phénomène que présente un fil métallique très-fin que l'on interpose entre les conducteurs pour fermer le circuit: si ce fil est un peu long, il devient chaud subitement; un peu plus court, il devient rouge; et, plus court encore, il devient rouge-blanc ; alors, suivant la nature du métal, il entre en fusion et tombe en gouttes, brûle avec éclat, ou reste inaltérable, persistant dans cet état d'incandescence pendant tout le temps que la pile est en activité.

L'eau, les acides, les oxides, les sels et tous les corps,

pour peu qu'ils soient conducteurs, éprouvent des effets remarquables lorsqu'on les place dans le *courant* de la pile, c'est-à-dire lorsqu'on les dispose entre les pôles, de manière qu'ils forment une partie du circuit et que leur substance soit traversée par les fluides contraires, comme les fils métalliques des expériences précédentes : mais, avant d'étudier ces effets, il importe de prendre une idée de ce qui constitue la force de la pile.

224. *Force de la pile.* — On doit distinguer dans la pile la *force physique* et la *force chimique*. La première dépend de la quantité d'électricité que peut donner la pile dans un instant, et la seconde dépend de la tension avec laquelle cette électricité s'écoule d'un pôle à l'autre.

La quantité d'électricité qu'une pile peut donner à chaque instant est proportionnelle à la grandeur des élémens quand toutes les autres circonstances sont les mêmes. Concevons en effet deux piles tout-à-fait pareilles et donnant par conséquent la même quantité d'électricité, il est évident que si on les dispose à côté l'une de l'autre et qu'on réunisse parallèlement les fils qui joignent leurs pôles, il passera dans ces fils deux fois autant d'électricité qu'il en passait dans un seul. Ainsi, les deux appareils n'en feront plus qu'un, ayant des élémens doubles en surface et donnant une quantité d'électricité double. En augmentant indéfiniment la grandeur des élémens sans en changer le nombre, on peut donc augmenter indéfiniment la quantité d'électricité donnée par la pile sans en changer la tension.

La quantité d'électricité augmente aussi à mesure que le conducteur humide devient plus parfait, mais elle diminue quand son épaisseur augmente, parce que l'électricité éprouve plus de résistance pour passer d'un élément au suivant.

La tension de la pile, qui est, comme nous l'avons vu, proportionnelle au nombre des élémens quand l'équilibre électrique est établi, ne peut pas manquer d'avoir une influence sur la nature du courant qui se développe aussitôt que les

deux pôles sont mis en communication, car, le courant n'est que la tendance à l'équilibre. Ainsi, quand le conducteur humide est assez parfait, les piles, qui ont un grand nombre d'élémens et par conséquent une grande tension à l'état d'équilibre, ont aussi une grande tension à l'état de mouvement, c'est-à-dire que les courans qu'elles produisent peuvent vaincre des résistances de plus en plus grandes à mesure que le nombre des élémens augmente.

Nous verrons que le courant peut produire des *effets physiques*, des *effets physiologiques*, et des *effets chimiques* : les effets physiques ne dépendent que de la quantité d'électricité, tandis que les effets chimiques et physiologiques dépendent essentiellement de la tension. Ainsi, une pile peut être *très-forte* physiquement et *très-faible* chimiquement; et *vice versâ*.

225. *Diverses dispositions de la pile.* — La *pile à colonne* dont nous avons parlé jusqu'à présent offre de grands inconvéniens dans la pratique : les rondelles inférieures, comprimées par le poids des élémens supérieurs, se dessèchent promptement, et le liquide qui s'en écoule, en ruisselant sur la surface de la pile, établit entre les couples de communications partielles qui diminuent d'autant l'effet total.

La *pile à auges* a été long-temps en usage, elle est représentée dans les figures 339 et 340. Les élémens sont rectangulaires et soudés l'un sur l'autre pour former un couple; tous les couples sont disposés de champ et parallèlement dans une caisse de bois, *b b'*, dont les parois intérieures sont revêtues d'un mastic non conducteur; l'intervalle des deux couples forme une petite auge dans laquelle on met l'eau acidulée : c'est cette lame d'eau de deux ou trois lignes d'épaisseur qui remplace la rondelle humide de la pile à colonne ; mais il faut avoir grand soin que les auges successives n'aient entre elles aucune communication, ni par les bords ni par la tranche supérieure des couples. En réunissant plusieurs piles semblables à celle qui est représentée dans la figure, on

compose une *batterie galvanique* ou *voltaïque*. La réunion peut se faire de deux manières ; les piles ayant, par exemple, cent couples de chacun 1 décimètre carré : si l'on en réunit deux, en faisant communiquer les deux pôles négatifs ensemble, et les pôles positifs ensemble, on aura une batterie de *cent* couples ayant chacun *deux* décimètres carrés ; c'est la force physique qui sera doublée : au contraire, si on les réunit en faisant communiquer le pôle positif de la première avec le pôle négatif de la seconde, on aura une batterie de *deux cents* couples ayant chacun 1 décimètre carré ; c'est la force de tension ou la force chimique qui sera doublée.

La *pile de Wolaston* est représentée dans les figures 341, 342, 346, 347 et 348. Pour en mieux indiquer la construction, nous examinerons seulement deux couples représentés en section (*fig.* 341), et de face (*fig.* 342) : *c s* est le premier cuivre, et *s z* le premier zinc, vu par son épaisseur ; ils sont soudés en *s* ; *c' s'* est le deuxième cuivre, et *s' z'* le deuxième zinc ; *v* et *v'* sont des vases remplis d'eau acidulée : l'électricité vitrée passe du premier zinc au deuxième cuivre par la couche d'eau qui les sépare ; elle passe de même du deuxième zinc au troisième cuivre ; et ainsi de suite. Cette disposition offre surtout deux grands avantages : premièrement, le fluide qui est sur le zinc peut en sortir par tous les points de la surface ; secondement, il n'a qu'une couche liquide très-mince à traverser pour se porter sur le cuivre, et cette couche, qui se trouve promptement altérée dans la pile à auge, peut ici se renouveler en se mélangeant au liquide du vase.

Un seul couple de cette espèce, ayant seulement quelques pouces carrés de surface, est capable de produire des phénomènes étonnans : il peut, par exemple, faire rougir un fil de platine. L'expérience en est représentée dans la figure 344 : *c s* est le cuivre, *s z* le zinc ; l'enveloppe *c' c' c'* ne sert qu'à favoriser la conductibilité ; un petit fil de platine est tendu de *p* en *p'*, et, quand on plonge ce couple par le manche *m* dans un vase d'eau fortement acidulée, le fil de platine devient

rouge à l'instant, par le seul effet du courant qui le traverse.

Avec une pile d'une vingtaine de couples, disposée comme celle des figures 346, 347 et 348, on peut faire à-peu-près toutes les expériences galvaniques. On la charge habituellement avec de l'eau contenant $\frac{1}{16}$ d'acide sulfurique et $\frac{1}{20}$ d'acide nitrique.

La *pile en hélice* n'est en réalité qu'une modification de la pile de Wollaston; elle est surtout déstinée à produire de grandes quantités d'électricité sans donner de grandes tensions. Les figures 349 et 350 représentent les dispositions que j'ai adoptées pour la pile de la Faculté des Sciences. Sur un cylindre en bois *b* (*fig.* 349), de trois pouces de diamètre et d'un pied de long, on enroule deux lames, l'une de zinc et l'autre de cuivre, qui sont séparées par des bouts de lisière de drap *l*, joints par de petites ficelles dont l'épaisseur est un peu moindre que celle de la lisière. On forme ainsi des couples dont les deux élémens ont chacun cinquante ou soixante pieds carrés de surface; un seul de ces couples (*figure* 350) est capable de produire des effets physiques très-énergiques, et, lorsqu'on réunit seulement 20 couples pareils on a une batterie d'une puissance extraordinaire pour chauffer et liquéfier instantanément, non pas des fils, mais de véritables tiges de métal.

226. *Effets physiologiques de la pile.* — Les *commotions* que produit l'électricité de la pile ne sont ni moins vives ni moins redoutables que celles des batteries ordinaires; leur intensité dépend surtout du nombre des paires, et par conséquent de la force de tension. L'épiderme est un mauvais conducteur, et l'on peut, avec les mains sèches, établir la communication entre les pôles d'une pile de 20 ou 30 paires, sans éprouver la moindre secousse : mais, avec les mains mouillées, ou seulement humides, on reçoit le choc instantanément; le courant qui s'établit alors dans les membres continue de les agiter aussi long-temps que dure le contact.

Dans les premiers temps du galvanisme, on a fait de nom-

breuses expériences sur les effets thérapeutiques des courans de la pile; on a essayé surtout de guérir les Névralgies, la Goutte, les Rhumatismes, les Paralysies, etc.: on dirigeait les courans comme les décharges électriques, au moyen d'armatures métalliques disposées de part et d'autre des organes affectés, et l'on augmentait peu-à-peu le nombre des paires de la pile pour rendre les commotions plus vives et plus efficaces. Depuis, l'on est parvenu à donner aux appareils beaucoup plus de précision et à graduer leur force d'une manière certaine; en même temps on a obtenu des effets plus assurés, et il paraît bien constant aujourd'hui que certaines affections cèdent au traitement galvanique lorsqu'il est employé avec discernement.

Dans les corps récemment privés de la vie, un courant énergique excite encore des commotions et des mouvemens extraordinaires : on dirait que toute l'organisation s'agite et fait d'incroyables efforts pour se ranimer; mais ces violentes convulsions cessent avec le courant, et tout retombe dans l'inertie de la mort.

Cependant, dans une série d'expériences que nous avons faites avec MM. Magendie, Andral et Roulin, sur l'irritabilité produite par les courans électriques, nous avons reconnu que des animaux asphyxiés sont promptement rappelés à la vie lorsqu'on les met entre les deux pôles de la pile : nous avons plusieurs fois ranimé des lapins et des cochons d'Inde qui étaient asphyxiés depuis plus d'une demi-heure.

Nous avons reconnu pareillement que le courant excite des mouvemens péristaltiques très-remarquables dans plusieurs vaisseaux.

La commotion est sans doute le plus simple de ces phénomènes physiologiques; elle est produite par l'électricité ordinaire comme par l'électricité de la pile, et, cependant, on ne sait rien jusqu'à présent sur sa véritable cause. Quelles sont les substances organiques que le fluide affecte de préférence? Quelles sont les modifications qu'il imprime, ou à

leurs molécules individuelles, ou au système qu'elles composent? C'est sans doute ce que des expériences ultérieures feront connaître. Les substances inorganiques sont, comme nous allons le voir, échauffées par le courant, ou décomposées chimiquement; et il est probable que, dans les corps vivans, ce n'est ni l'un ni l'autre de ces effets qui produit la commotion.

M. Marianini a constaté à cet égard un fait remarquable, c'est que quand le courant électrique se propage dans les nerfs, *dans le sens de leurs ramifications*, il produit une contraction musculaire au moment où il pénètre, et une sensation au moment où il cesse: et qu'au contraire, quand il s'y propage *en sens inverse de leurs ramifications*, il produit une sensation tant qu'il subsiste, et une contraction au moment où il cesse. (*Ann. de Phys. et de Chim.*, t. 40, p. 225.)

227. *Effets physiques de la pile.* — Les courans peuvent produire, comme les décharges des batteries ordinaires, de la chaleur, de la lumière et du magnétisme.

Lorsqu'un fil métallique assez fin et assez court établit une communication directe entre les pôles de la pile, il s'échauffe, devient rouge, rouge-blanc, et souvent même il se fond et se volatilise.

Le fer et l'acier se liquéfient facilement, alors ils brûlent avec un éclat éblouissant.

Les minces feuilles d'or sont volatilisées, et, comme on ne peut en toucher un point sans le réduire en vapeur, il s'établit de nombreuses solutions de continuité entre lesquelles on voit briller une foule de petits éclairs d'une couleur verte très-vive.

Les feuilles d'argent présentent à-peu-près les mêmes phénomènes.

Les feuilles d'étain brûlent avec moins d'éclat; elles tombent en petits globules rouges, qui donnent naissance à des houppes soyeuses flottantes, semblables à des flocons de toile d'araignée.

Le platine en éponge, et tous les métaux en feuilles min-

ces ou en limailles offrent quelques particularités curieuses, dépendantes de leur nature, de leur fusibilité, et de leur affinité pour l'oxigène.

Une des expériences les plus curieuses, sur les effets de lumière et de chaleur produits par la pile, est celle que l'on doit à sir H. Davy, et dont nous aurons occasion de parler encore dans l'électro-magnétisme. Elle peut se disposer de la manière suivante : dans une grande cloche ou dans un ballon de 10 à 12 pouces de diamètre on adapte deux boîtes à cuir, opposées l'une à l'autre, par lesquelles on fait passer deux fortes tiges qui peuvent s'approcher jusqu'au contact, ou s'éloigner à volonté ; à l'extrémité de chaque tige on attache un petit cône de charbon fortement calciné et éteint dans le mercure, mais il faut que le charbon touche le métal par une grande surface. Alors, on fait le vide dans l'appareil, on avance les tiges de manière que les pointes des cônes se trouvent à une petite distance, et l'on établit la communication entre les deux pôles d'une forte pile ; bientôt le courant franchit l'espace qui sépare les charbons, échauffe leurs pointes et les rend éblouissantes de lumière : rien n'est comparable à l'éclat qu'elles prennent. Dès cet instant, l'on peut écarter les tiges graduellement, le courant ne cesse pas de traverser le vide qui les sépare, et, de cette manière, on produit un faisceau étincelant qui remplit tout l'appareil. Le phénomène ne se montre pas avec moins d'éclat dans de l'air raréfié à quelques centimètres de pression, mais alors le charbon se consume en partie.

228. *Effets chimiques de la pile.* — Le premier et le plus remarquable des effets chimiques de la pile fut découvert au commencement de ce siècle (le 30 avril 1800) par MM. Carlisle et Nicholson. Ces deux physiciens, pour répéter les expériences de Volta, avaient construit à la hâte une pile à colonne avec des pièces de monnaie, des plaques de zinc et des rondelles de carton. Après quelques essais, l'odeur particulière de l'hydrogène s'étant fait sentir, Nicholson eut

l'heureuse idée de faire passer le courant dans un tube plein d'eau, par le moyen de deux fils de métal qui s'approchaient à une petite distance. Bientôt l'hydrogène parut en petites bulles tout autour du *fil négatif*, et le *fil positif* s'oxidait visiblement. Ainsi, les deux élémens de l'eau furent enfin séparés ; car Cavendish avait bien pu composer de l'eau avec de l'oxigène et de l'hydrogène, mais jusque-là tous les efforts avaient été impuissans pour la décomposer.

L'appareil qui nous sert maintenant pour la séparation des élémens de l'eau est représenté dans la figure 345 ; il se compose d'un verre à pied dont le fond est traversé par deux fils de platine *f*, *f'* qui ne doivent pas se toucher ; les cloches *o* et *h*, renversées et pleines de liquide, couvrent chacun des fils. Aussitôt qu'on établit la communication avec les pôles de la pile, les bulles de gaz se dégagent en abondance ; l'oxigène pur monte toujours dans la cloche qui couvre le fil positif, et l'hydrogène pur toujours dans celle qui couvre le fil négatif. Il est évident que les deux cloches doivent communiquer entre elles par le liquide intermédiaire, car le courant ne peut pas traverser le verre.

L'eau distillée et parfaitement pure se décompose lentement ; mais, dès qu'on y met une goutte d'un acide quelconque, ou quelques atomes de sel, ou quelques parcelles d'une substance qui augmente sa conductibilité, les bulles de gaz se dégagent vivement, et il ne faut que 2 ou 3 minutes pour voir 1 centimètre cube d'oxigène dans la cloche positive, et 2 centimètres cubes d'hydrogène dans la cloche négative.

Deux atomes d'hydrogène à l'un des pôles et un atome d'oxigène à l'autre, voilà un phénomène bien surprenant et qui a long-temps exercé la sagacité des physiciens ; car dans les décompositions ordinaires, les élémens se désunissent et ne s'éloignent pas l'un de l'autre, tandis qu'ici il y a tout à la fois séparation et *transport* des élémens séparables. On a fait des tentatives sans nombre pour saisir la molécule

d'eau qui se décompose, ou pour arrêter en chemin les atomes gazeux avant qu'ils fussent arrivés aux fils de métal d'où l'électricité passe dans le liquide; mais, rien n'a réussi. Par exemple, quand on met de l'eau dans deux vases, que l'on fait plonger le fil positif dans l'un, le fil négatif dans l'autre, et qu'ensuite on établit la communication entre les vases par un corps conducteur pour que la circulation électrique puisse s'établir, on observe des phénomènes singuliers : si le conducteur intermédiaire est un métal, l'eau est encore décomposée comme à l'ordinaire, mais dans chaque vase séparément; s'il est un corps humide, quelquefois encore il la décompose comme un métal, mais le plus souvent la décomposition se fait on ne sait où; l'oxigène paraît seul dans l'un des vases, dans le positif, et l'hydrogène seul dans l'autre; c'est ce qui arrive, par exemple, quand on établit la communication en plongeant un doigt dans chaque vase. Alors, on semble en droit de conclure que l'un des élémens gazeux a dû traverser le corps pour se rendre au pôle où il se dégage. De même, quand on établit la communication avec un morceau de glace, il semble nécessaire que l'un ou l'autre des gaz passe au travers de la glace, puisque chacun d'eux ne se dégage qu'à l'un des fils métalliques.

M. Grotthuss a donné, de ces phénomènes et de toutes les autres décompositions chimiques que produit le courant, une explication qui a été admise par tous les physiciens, non seulement parce qu'elle est ingénieuse, mais aussi parce qu'elle semble tout-à-fait conforme à la vérité. Concevons un fil de molécules d'eau, 1, 2, 3, 4, etc. (*fig.* 351), formant une espèce de chaîne droite ou courbe qui joint le fil positif *f* au fil négatif *f'* : l'électricité positive de *f* agira par influence sur la molécule 1 et la *tournera* pour attirer l'oxigène qui est *électro-négatif* et pour repousser l'hydrogène qui est *électro-positif*; la molécule 1 agira de même sur la molécule 2, et ainsi de suite; à l'autre extrémité de la

chaîne, la même disposition se produira, et, dès que la tension électrique sera assez forte, l'oxigène de la molécule 1, entraîné par l'attraction, sera comme arraché des molécules d'hydrogène auxquelles il est uni et s'en viendra au pôle, tandis que l'hydrogène, devenu libre, se portera sur l'oxigène de la molécule 2 pour se combiner avec lui, donnant la liberté à l'hydrogène de cette molécule, qui s'en ira à son tour prendre l'oxigène de la molécule 3, et ainsi de suite. A l'autre pôle, des phénomènes analogues se produisent en sens inverse, et il y aura ainsi au même instant une foule de décompositions et de recompositions successives. Ce qui se passe dans une foule de molécules se passe dans toutes les files qui joignent les deux pôles; et, de là, la multitude des atomes gazeux devenus libres, et l'abondance des bulles distinctes qui se forment et qui se dégagent.

Ces mouvemens vibratoires des derniers élémens de la matière peuvent s'accomplir au milieu des masses solides comme au milieu des masses fluides; et certainement, si, comme tout semble l'indiquer, l'explication de M. Grotthuss est vraie pour la décomposition des liquides, elle ne peut manquer de l'être pour celle des solides et de tous les autres corps sur lesquels le courant électrique peut avoir quelque prise.

Les oxides sont réduits par la pile et décomposés comme l'eau; l'oxigène paraît au pôle positif, et le métal ou la base au pôle négatif. Pour ceux qui sont facilement réductibles, pour l'oxide d'argent, par exemple, on peut disposer l'expérience de la manière suivante : sur une lame de platine communiquant au pôle positif, on met de l'oxide sec en poudre, que l'on vient toucher ensuite avec le fil négatif: soit que le contact soit permanent, soit qu'il soit accidentel et renouvelé par intervalle, on voit bientôt paraître une petite loupe d'argent à l'extrémité du fil; dans le second cas, la poussière de l'oxide est traversée par de vives étincelles d'une belle couleur verte. Les oxides moins réductibles doivent être

légèrement humectés d'eau, surtout lorsqu'ils sont en poudre. A la vérité, cette eau se décompose en partie; mais elle favorise la conductibilité, et, après un certain temps, on aperçoit, suivant la force de la pile, de petits globules ou de petites parcelles de métal autour du fil négatif.

Pendant long-temps on avait supposé que les alcalis, tels que la soude et la potasse, étaient des corps tout-à-fait indécomposables; mais, en 1807, au moyen d'une puissante batterie, sir H. Davy put en séparer les élémens. Cette découverte fut une grande époque pour la science. Les alcalis et les terres furent ramenés dans la classe ordinaire des oxides, et la chimie eut à sa disposition deux corps métalliques nouveaux, le sodium et le potassium, qui sont deux des agens les plus énergiques qu'elle possède. Lorsqu'on tente la décomposition de la potasse par les méthodes que nous venons d'indiquer pour les autres oxides, l'on aperçoit bientôt que des globules nombreux paraissent au pôle négatif et s'enflamment dans l'air en produisant des jets de lumière. C'est le potassium qui résulte de la décomposition de la potasse; son affinité pour l'oxigène est si grande qu'il brûle dans l'eau avec plus d'éclat encore que dans l'air : aussi ne peut-on le conserver que dans l'huile rectifiée de naphte ou de pétrole, dont les élémens constitutifs sont l'hydrogène et le carbone. Le D. Seebeck a donné le moyen de recueillir plus sûrement le potassium au pôle de la pile; il a imaginé de former une petite capsule avec le fragment de potasse caustique que l'on veut décomposer; cette capsule est remplie de mercure et posée sur une lame de platine communiquant au pôle positif de la pile : alors, en touchant le mercure avec le pôle négatif, la décomposition s'opère; l'oxigène se porte sur le platine, et se dégage, tandis que le potassium arrive dans le mercure et forme avec lui un amalgame assez persistant. Par la distillation dans la vapeur du pétrole, l'on sépare ensuite le mercure, et l'on obtient le potassium à l'état de pureté.

La chaux, la baryte et les autres terres, traitées de la même manière, soit seules, soit mélangées avec la soude ou la potasse, ont donné des preuves non douteuses de leur décomposition.

Les acides se décomposent comme les oxides, et leur oxigène persiste encore à se rendre au pôle positif, tandis que la base vient au pôle négatif.

Enfin, tous les sels sont aussi décomposés par la pile; mais ils présentent des phénomènes plus variés.

1° Quand l'acide et la base sont difficilement décomposables, ces deux élémens sont simplement séparés; et l'acide, comme participant davantage des propriétés de l'oxigène, se rend toujours au pôle positif, tandis que la base vient au pôle négatif;

2° Quand l'acide est facilement décomposable, non seulement il est séparé de l'oxide, mais il est lui-même décomposé, ou au moins désoxigéné; et l'oxigène qu'il perd vient au pôle positif, tandis que le radical s'en va avec l'oxide au pôle négatif;

3° Quand l'oxide est facilement décomposable, il est lui-même réduit; son métal pur vient au pôle négatif, tandis que l'oxigène se rend au pôle positif, où il se combine avec l'acide, quand celui-ci est capable de recevoir un nouveau degré d'oxigénation;

4° Si l'acide et l'oxide peuvent l'un et l'autre perdre aisément leur oxigène, la décomposition est complète : tout l'oxigène vient au pôle positif, et le métal de l'oxide se rend au pôle négatif avec le radical de l'acide.

Ces divers phénomènes peuvent se produire avec des sels simplement humectés, ou avec des dissolutions salines plus ou moins étendues; dans ce dernier cas, surtout, l'eau est abondamment décomposée.

Pour un sel dont l'acide n'est pas l'acide fluorique et dont la base n'est pas l'une des terres ou l'un des alcalis qui se décomposent difficilement, on peut à volonté obtenir la

simple séparation de l'acide et de l'oxide, ou la réduction de l'un et l'autre. Il suffit pour cela d'employer une pile très faible ou une pile très puissante ; et, comme on peut affaiblir une pile en forçant le courant à traverser un long espace mauvais conducteur, on voit que la seule distance des fils pourra déterminer l'un ou l'autre des phénomènes. Pour une petite distance entre le fil positif et le fil négatif, le courant ayant toute son énergie, l'acide sera décomposé et l'oxide réduit; pour une distance un peu plus grande, l'acide, par exemple, ne sera pas décomposé ; et, pour une distance plus grande encore, l'oxide lui-même cessera d'être réduit ; il n'y aura plus qu'une simple séparation des élémens du sel.

Les couleurs végétales qui changent par l'action des acides et des oxides sont très propres à montrer aux yeux cette puissance décomposante de la pile. Si l'on prend, par exemple, dans un tube courbé en forme de V (*fig.* 345), une dissolution de teinture de tournesol, de chou rouge ou de petits radis violets, et qu'on y fasse passer le courant au moyen de deux fils de platine *a* et *b*, on aperçoit, après quelques instans, une belle couleur rouge de vin paillet dans la branche positive, et une couleur verte dans la branche négative. Le sel qui constitue la couleur végétale est donc décomposé ; son oxide, en se portant au pôle négatif, fait tourner au vert tout le liquide voisin, et son acide, au contraire, fait passer au rouge le liquide qui touche le fil positif. En établissant la communication en sens inverse, on voit les couleurs produites disparaître peu à peu ; pendant un instant les deux branches reprennent l'état naturel, et un moment après elles se colorent en sens contraire.

Sir H. Davy a profité des circonstances remarquables qui accompagnent la décomposition des sels pour étudier plus particulièrement le phénomène étonnant du transport. Nous regrettons de ne pouvoir donner ici qu'un extrait fort abrégé de ses importantes recherches.

1° Un vase contenant une dissolution saline et un autre vase contenant de l'eau distillée communiquent entre eux par des filamens humides d'amiante. Le fil positif de la pile plonge dans le premier, le fil négatif dans le second, et la décomposition s'opère; si l'oxide n'est pas réduit, il chemine sur l'amiante, traverse l'eau, et vient se rendre au pôle négatif; s'il est réduit, c'est le métal qui parcourt ce trajet. Par exemple, avec le nitrate d'argent, tous les filamens soyeux de l'amiante se couvrent d'une multitude de petites parcelles d'argent revivifié. En établissant la communication en sens inverse, c'est l'acide qui parcourt l'amiante pour venir aciduler l'eau qui se trouve alors au pôle positif;

2° La dissolution saline étant placée entre deux vases d'eau pure, et communiquant avec chacun d'eux par de l'amiante, il y a encore décomposition et transport dès que les deux fils de la pile plongent, l'un dans le premier vase d'eau, et l'autre dans le second. L'acide est encore transporté au pôle positif et l'oxide au pôle négatif;

3° Trois vases sont disposés comme dans l'expérience précédente : le premier contient de l'eau pure, le troisième une dissolution saline, et celui du milieu une teinture végétale, de tournesol ou de sirop de violette. Le sel est encore décomposé par le courant, et dans le vase d'eau pure on trouve l'acide ou l'oxide, suivant qu'on établit la communication dans un sens ou dans l'autre. Mais, et c'est un phénomène bien digne de remarque, dans aucun cas la teinture végétale n'éprouve d'altération; elle n'est ni rougie par l'acide, ni verdie par l'oxide; et, cependant, elle est à coup sûr traversée par l'un ou l'autre. Ainsi les élémens chimiques semblent perdre au moins en partie leurs forces d'affinité pendant qu'ils se trouvent sous l'action du courant électrique qui les emporte;

4° Lorsqu'à la teinture végétale on substitue quelque dissolution alcaline très concentrée et très puissante, il y a des acides qui ne peuvent pas la traverser; ils sont arrêtés

au passage; et, dans ces circonstances seulement, c'est la dissolution elle-même qui devient le pôle de la pile; le vase d'eau pure est encore traversé par l'électricité, mais l'acide ne peut arriver jusqu'à lui;

5° Lorsqu'à la teinture végétale on substitue quelque acide très puissant et concentré, il y a aussi des oxides qui ne peuvent le traverser; ils se combinent avec lui sans pouvoir se rendre au pôle qui les attire.

Ces deux derniers phénomènes sont une preuve que les affinités chimiques, toujours modifiées par le courant, ne sont pas toujours détruites par lui, et qu'il y a des cas où elles conservent encore assez d'énergie pour s'exercer malgré son influence. Peut-être un courant plus fort serait-il capable de neutraliser les actions chimiques qui s'exercent encore sous un courant plus faible.

Les divers oxides qui entrent dans la composition du verre peuvent eux-mêmes être réduits ou séparés par l'action de la pile. Les substances végétales et animales peuvent pareillement être décomposées lorsqu'elles sont humides. Ces phénomènes, auxquels on était loin de s'attendre quand on ne connaissait pas encore toute la puissance de l'appareil de Volta, répandaient une grande confusion dans les premières expériences. Par exemple, l'eau la plus pure devenait tantôt acide, tantôt alcaline, sous l'influence du courant. Quelques expérimentateurs y trouvaient alors de l'acide nitrique et de l'ammoniaque; d'autres de l'acide hydrochlorique; d'autres enfin un acide qu'ils proposaient d'appeler acide électrique, supposant qu'il était formé de toutes pièces par une combinaison véritablement chimique du fluide électrique et de l'eau.

Sir H. Davy expliqua le premier l'origine de toutes ces substances, en démontrant qu'elles provenaient du verre ou des membranes végétales ou animales que l'on employait dans les expériences; il fit connaître en même temps le phénomène du transport dans ses détails, et jeta les premiers

fondemens de la science électro-chimique. (*Trans. phil.*, 1807, et *Ann. de Chimie*, t. 63.) C'est ainsi qu'il débuta dans cette immense carrière, où il devait faire de si belles découvertes et mériter une si grande renommée.

MM. Gay-Lussac et Thénard ont fait aussi avec la grande pile de l'école Polytechnique un grand nombre de découvertes importantes, dont on trouve les détails dans le grand ouvrage qu'ils ont publié sur ce sujet (*Recherches physiques, chimiques, etc.*), mais ces recherches sont liées aux théories chimiques d'une manière trop intime pour qu'il nous soit possible d'en faire connaître ici les principaux résultats.

On doit aussi au docteur Seebeck un fait très curieux: on met quelques grammes de mercure dans une capsule d'hydrochlorate d'ammoniaque (fig. 352), on pose cette capsule sur une lame de métal communiquant au pôle positif d'une forte pile, et dès qu'on touche le mercure avec le fil négatif, on le voit pousser comme un champignon et prendre un volume cinq ou six fois plus grand que son volume primitif. MM. Gay-Lussac et Thénard ont analysé ce produit (*Recherches physico-chimiques*, t. 1er) et ils ont reconnu que le mercure absorbe ainsi un volume d'hydrogène représenté par 3,47 et un volume d'ammoniaque représenté par 4,22.

CHAPITRE III.

Des piles sèches.

229. *Construction des piles de Zamboni.* — Dans les piles sèches, les *élémens électro-moteurs* sont encore des substances métalliques, mais le *conducteur* qui sépare les différens couples n'est plus une dissolution liquide; c'est un corps solide quelconque, parfaitement sec ou légèrement humide, ou imbibé de quelque substance qui ne soit pas absolument imperméable à l'électricité; car il faut toujours que les fluides électriques, développés au contact des métaux, puissent avec le temps circuler dans toute l'étendue de la pile. Entre toutes les dispositions qui ont été successivement indiquées par d'habiles observateurs, celle de M. Zamboni paraît une des plus efficaces. On prend des feuilles de papier ordinaire, un peu fort, et humide autant qu'il peut l'être naturellement par un temps pluvieux; d'un côté on colle avec la gélatine, la gomme ou l'amidon, une feuille de zinc laminé et ensuite battu; sur le revers on met du peroxide de manganèse très bien porphyrisé, en l'étalant à plusieurs reprises avec un bouchon, ou seulement avec un morceau de papier. Alors, on superpose dans le même ordre plusieurs feuilles semblables, et, avec un emporte-pièce de 10 à 15 lignes de diamètre, on enlève à chaque fois autant de disques qu'il y a de feuilles. Ces disques sont, à leur tour, superposés dans le même ordre, et l'on fait ainsi des piles de 500, de 1000 ou de 2000 couples. Pour mieux assurer le contact, on met les disques en presse, après avoir disposé à chaque bout des pièces de métal assez fortes, portant cinq ou six appendices saillans, qui se lient l'un à l'autre avec du

cordonnet de soie ; ensuite, pour garantir la pile du contact de l'air, on la plonge dans du soufre fondu ou dans de la gomme laque.

Quelquefois on imbibe le papier avec une légère dissolution saline, ou bien avec du lait, du miel, du beurre, de l'huile d'œillet, de l'essence de térébenthine, etc. ; mais, si les piles qui sont faites par ces moyens ont l'avantage de paraître un peu plus fortes dans les premiers instans, elles ont aussi l'inconvénient de se détériorer promptement, en comparaison des premières, car il est rare qu'aprés quelques années elles conservent encore toute leur énergie primitive.

Au lieu d'employer le zinc avec l'oxide de manganèse, on peut sans désavantage employer l'étain.

230. *Propriétés des piles sèches.* — Une pile de Zamboni, composée par exemple de 2000 paires, ne peut donner la moindre commotion ni produire la moindre décomposition chimique : cependant, si l'on touche l'un des pôles avec un plan d'épreuve, on y prend une charge sensible, et au moyen de la balance électrique on peut comparer entre elles les tensions des différentes piles, ou les tensions que donne une même pile à différentes époques ; de même, en touchant l'un des pôles pendant un instant, avec le condensateur à taffetas, on obtient une telle charge qu'il est quelquefois possible d'en tirer une forte étincelle. Cette différence si prodigieuse qui se remarque entre une pile de 2000 paires, chargée avec du papier humide, et une pile de 2000 paires pareilles, chargée avec de l'eau acidulée, tient surtout à l'imperfection de la conductibilité des rondelles de papier ou des autres corps qui séparent les différens couples : les fluides ne peuvent se transmettre que lentement pour arriver jusqu'au pôle, et c'est cette lenteur qui détermine les conditions d'équilibre dont nous allons faire l'analyse.

1° Si la pile est isolée par les deux pôles et abandonnée à elle-même dans de l'air parfaitement sec, les électricités qui se développent sur tous les élémens se propagent

peu à peu au travers du conducteur imparfait, et s'accumulent, l'une au pôle positif, l'autre au pôle négatif; mais la tension cesse d'augmenter, et l'équilibre est établi, dès que la quantité de fluide qui arrive, après avoir vaincu toutes les résistances, est égale à la quantité de fluide qui se dissipe par le contact de l'air. A partir de cet instant, la force de la pile sera constante, les fluides paraîtront immobiles et comme fixés à ses deux extrémités : mais il ne faut pas perdre de vue qu'en réalité ils sont sans cesse en mouvement, se perdant toujours par l'air et se reproduisant toujours ; c'est un *équilibre mobile* et non pas un équilibre stationnaire.

2° Il est évident, par ce qui précède, que la même pile, transportée dans de l'air de plus en plus humide, y paraîtra de plus en plus faible, car la cause qui reproduit le fluide reste la même, tandis que la cause qui l'enlève augmente avec l'humidité; il faut donc qu'un nouvel équilibre s'établisse, et il s'établit en effet lorsque la tension est affaiblie à tel point que l'air humide, en agissant sur cette tension moindre, enlève précisément autant de fluide que l'air sec en enlève en agissant sur une tension plus grande.

3° Lorsqu'une pile sèche, au lieu d'être abandonnée à elle-même dans l'air sec ou humide, est tellement disposée qu'on lui enlève directement une partie de son fluide, elle présente alors des phénomènes encore plus variés, mais tout aussi faciles à expliquer par les mêmes considérations de l'équilibre mobile. Supposons, par exemple, que l'on dispose à côté l'une de l'autre deux piles de 2000 couples chacune, formant deux colonnes d'environ un pied de hauteur : leurs pôles supérieurs sont, l'un positif, et l'autre négatif; leurs pôles inférieurs communiquent entre eux par une bande de métal : par cette disposition, les deux piles, en réalité, n'en forment qu'une seule de 4000 couples, car c'est exactement comme si l'on avait pris une pile de 4000 couples, et qu'on l'eût brisée par le milieu, en conservant une commu-

nication entre les deux sections de rupture. Imaginons maintenant que l'on suspende entre les deux pôles contraires supérieurs, et à une égale distance, une aiguille métallique légère, parfaitement mobile et *isolée*. Cette aiguille, également attirée par les deux pôles, n'aura pas de raison pour aller à l'un plutôt qu'à l'autre, elle restera immobile. Mais si une première cause la dérange, elle va, sous certaines conditions, faire *un mouvement perpétuel*. En effet, arrivant, par exemple, au contact du pôle positif, elle s'y charge d'électricité positive, se trouve repoussée par ce pôle, et attirée par l'autre qu'elle vient toucher à son tour ; sur celui-ci, elle dépose l'électricité positive qu'elle avait pris au premier, se charge d'électricite négative, se trouve repoussée de nouveau et attirée en sens contraire ; elle revient donc au pôle positif, retourne au pôle négatif, et ainsi de suite. Une aiguille bien ajustée semble devoir exécuter ces oscillations regulières sans trouble et sans repos, aussi long-temps que l'on voudra. Mais il y a toujours quelque accident qui dérange ou qui arrête ce mouvement que l'on avait pris d'abord pour une sorte de *mouvement perpétuel*. Dans ce cas, il y a deux causes qui enlèvent l'électricité de la pile, savoir, l'air et l'aiguille ; et une seule cause toujours constante qui la reproduit. Si, pour un état donné de l'air, l'aiguille est tellement combinée pour sa forme, ses dimensions, et la rapidité de ses oscillations, que la somme des quantités de fluides enlevées par elle et par l'air soit justement égale à la quantité de fluide qui se développe dans le même temps, il y aura compensation parfaite, les oscillations seront regulières, isochrones, et se continueront aussi long-temps que les choses resteront dans cet état : mais, si l'air devient plus sec, les oscillations seront plus rapides ; s'il devient plus humide, elles seront plus lentes ; et s'il devient plus humide encore, l'aiguille pourra s'arrêter. Voilà comment s'expliquent toutes les singularités bizarres et, pour ainsi dire, tous les caprices de l'appareil que nous venons de décrire ; on le

voit, en effet, marcher tantôt vite, tantôt lentement, s'arrêter par intervalles, puis reprendre sa marche après un temps plus ou moins long. Si même on veut l'arrêter à volonté, rien n'est plus facile : il suffit de souffler sur les pôles, ou de les toucher un instant avec la main ou avec un bon conducteur ; car toute la pile se décharge, et il lui faut souvent quelques heures pour reproduire les quantités de fluide capables de déterminer les mouvemens de l'aiguille.

Dans les premiers temps de l'invention de la pile sèche, ces périodes et ces intermittences de mouvement avaient été prises par quelques observateurs pour des signes ou pour des présages liés aux phénomènes météorologiques. Mais l'on voit, par ce qui précède, qu'elles ne sont dépendantes que des variations accidentelles de l'humidité environnante.

231. *Electroscope de Böhnenberger.*—M. Bohnenberger a fait une application des piles sèches qui semble d'abord assez ingénieuse ; après avoir supprimé l'une des feuilles d'or du condensateur à lames d'or, il dispose à égale distance de la feuille restante les deux pôles d'une pile très peu énergique ; alors il est évident que la moindre charge d'électricité résineuse ou vitrée détermine cette feuille très mobile à se porter vers le pôle positif ou vers le négatif, et qu'une fois en mouvement, elle doit continuer ses allées et venues pendant un temps plus ou moins long. Mais cet appareil m'a toujours paru infidèle, soit à cause de l'agitation de l'air de la cloche, soit à cause de l'électricité que cet air reçoit des deux pôles de la pile.

232. *Piles secondaires.* Lorsqu'on forme une colonne en superposant alternativement un disque de cuivre et un disque de carton humide et en liant tout le système à la manière des piles sèches, on obtient un appareil qui n'est aucunement électromoteur, mais qui a cependant quelque analogie avec la pile et qui s'appelle pour cette raison *pile secondaire.* Il suffit, en effet, de mettre les deux bouts d'une pile secondaire en contact avec les deux

pôles d'une pile à forte tension, pour qu'après un certain temps, cette pile secondaire soit capable de reproduire elle-même tous les phénomènes de la pile. Ainsi, après l'avoir séparée de la pile qui l'a chargée, elle donne à un de ses pôles l'électricité positive, et à l'autre pôle l'électricité négative, elle produit même quelques phénomènes chimiques; enfin, si on la décharge, elle se recharge seule un certain nombre de fois comme une pile sèche. Ces phénomènes, découverts par Ritter, s'expliquent par l'imparfaite conductibilité du système. Une simple bande de papier humide, interposée entre les deux pôles de la pile, présente les mêmes phénomènes, mais avec beaucoup moins d'intensité; elle se charge aussi d'électricité positive sur la moitié de la longueur qui touche au pôle positif de la pile et d'électricité négative sur l'autre moitié; cette charge se maintient assez long-temps, et, lorsqu'on met les deux extrémités dans leur état naturel, les deux fluides qui couvrent encore la partie centrale se répandent en vertu de leur répulsion propre pour réparer ces pertes, jusqu'à ce qu'enfin les deux électricités reçues de la pile soient recomposées ou dissipées par le contact de l'air.

QUATRIÈME SECTION.

DE L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

CHAPITRE PREMIER.

De l'action des courans sur les courans.

233. *Découverte de l'électro-magnétisme.* — En 1820 M. Œrsted, professeur à Copenhague, fit la découverte fondamentale qui a donné naissance à l'*électro-magnétisme;* on savait déjà que dans certaines circonstances les puissantes décharges électriques peuvent affecter l'aiguille aimantée; on avait observé par exemple sur des vaisseaux frappés de la foudre que les aiguilles de boussole perdaient la propriété de marquer la route du bâtiment; plusieurs physiciens, parmi lesquels on peut citer Franklin, Beccaria, Wilson et Cavallo, avaient essayé de reproduire ces phénomènes par la décharge d'une bouteille de Leyde ou par celle d'une grande batterie, et ils étaient en effet parvenus à modifier le magnétisme des aiguilles très petites, soit en les mettant dans le circuit de l'explosion, soit en les exposant simplement à quelque distance de l'étincelle; mais ces expériences n'ayant pu produire aucun phénomène régulier, on se contenta d'admettre que le choc électrique agissait alors comme le choc du marteau, et le sujet fut abandonné. Un peu plus tard on fit, avec l'électricité de la pile, quelques nouveaux essais qui ne furent pas plus heureux. Enfin, M. Œrsted trouva le moyen de faire

agir l'électricité sur le magnétisme d'une manière sûre et permanente. Le mode d'action une fois découvert et défini avec précision, les phénomènes fondamentaux se présentèrent d'eux-mêmes à M. OErsted ; une immense carrière fut ouverte aux savans de tous les pays, et jamais peut-être on ne vit, dans une si courte période, la science s'enrichir de tant de vérités nouvelles.

Pour que les fluides électriques agissent sur le magnétisme, il suffit d'une seule condition : il suffit qu'ils soient en mouvement.

En effet, un fil conducteur étant traversé par le courant de la pile, si on en approche une aiguille aimantée librement suspendue, on la voit qui se dévie de sa position, et qui fait une foule d'oscillations sans être en général ni attirée ni repoussée. C'est la première expérience de M. OErsted. Lorsqu'on voit une action si vive, qui se fait sentir encore même à la distance de plusieurs pieds, on s'étonne que, parmi tant d'expériences qui ont été faites avec la pile, le hasard n'ait pas une seule fois offert à l'observation un phénomène de cette nature.

La force qui s'exerce ainsi entre le courant de la pile et le magnétisme de l'aiguille est ce que l'on appelle la *force électro-magnétique*. Il est facile de constater par l'expérience que la force électro-magnétique présente les caractères suivans :

1° Qu'elle diminue à mesure que la distance augmente entre le courant et l'aiguille ;

2° Qu'elle s'exerce dans tous les sens et au travers de toutes les substances, excepté au travers des substances magnétiques.

Voici maintenant quelques suppositions qui nous seront utiles pour caractériser les phénomènes d'une manière plus commode et plus précise : nous admettrons dans le courant une *direction* déterminée, et nous la définirons en disant qu'il va toujours du pôle positif au pôle négatif en passant

par le conducteur qui joint les pôles; ainsi, quand les communications sont établies, et que le mouvement électrique s'accomplit dans tout le circuit de la pile, nous dirons, en parlant de l'arc *z a*, qui touche au pôle positif, que le courant le traverse en passant de *z* en *a* (*Fig.* 353); pareillement *a a'* est traversé de *a* en *a'*, *a' a''* de *a'* en *a''*, et enfin *c z* de *c* en *z*; et en considérant le circuit complet, nous dirons toujours que le courant va de *c* en *z* en passant par la pile, et de *z* en *c* en passant par le conducteur. Nous désignerons souvent le courant par les formes et par les dimensions du conducteur qu'il traverse; quand il passe par un conducteur rectiligne, nous l'appellerons *courant rectiligne*; par un fil très fin, *courant linéaire*; par un cylindre creux, *courant cylindrique*; par un fil courbe, *courant curviligne*; par un cercle, *courant circulaire*; par un conducteur indéfini dans sa longueur, *courant indéfini*; par un conducteur rentrant sur lui-même et formant un circuit complet, *courant fermé*, etc. Aucune de ces expressions ne doit être prise à la lettre: quand nous disons qu'il y a un courant dans le conducteur qui joint les deux pôles de la pile, nous ne voulons nullement faire entendre qu'il y a dans ce conducteur un mouvement de transation du fluide vitré depuis le pôle positif jusqu'au pôle négatif, et mouvement de translation du fluide résineux en sens inverse, car il est probable, au contraire, comme nous l'avons déjà indiqué plusieurs fois, que la recomposition des électricités se fait autour de toutes les molécules pondérables et dans tous les intervalles qui les séparent.

234. *Le courant tend à tourner l'aiguille en croix avec lui, le pôle austral à gauche.*—La figure 354 représente une aiguille aimantée *b a*, au-dessus de laquelle passe horizontalement un courant rectiligne *c c'*, situé dans le plan du méridien magnétique, et dirigé de *c* en *c'*; l'aiguille est chassée hors de sa direction primitive; son pôle *austral* est poussé à *l'occident*; et, après quelques oscillations, elle s'ar-

rête dans la position b' a', éprouvant ainsi une déviation mesurée par l'arc aa'. Cette déviation augmente ou diminue suivant que l'on abaisse le courant pour l'approcher plus près de l'aiguille, ou qu'on le relève pour l'en éloigner.

Les choses étant ramenées au premier état, si de nouveau l'on approche le courant, mais en le retournant pour qu'il aille en sens contraire, de c' en c, comme il est marqué par la petite flèche ponctuée, l'aiguille éprouve encore les effets de sa présence; alors son pôle *austral* est poussé à *l'orient*, ét c'est dans la position $b''a''$ qu'elle vient s'arrêter.

Ainsi, *au-dessus* de l'aiguille, le courant dévie le pôle austral à l'occident quand il vient lui-même du sud au nord, et il le dévie à l'orient quand il vient au contraire du nord au sud.

On peut répéter les mêmes expériences en faisant passer le courant *au-dessous* de l'aiguille, toujours horizontalement et dans le plan du méridien magnétique : alors, chose surprenante, les effets sont précisément inverses, c'est à dire que le pôle austral est poussé à l'orient quand le courant va du sud au nord, et poussé à l'occident quand il vient du nord au sud.

Dans ces phénomènes la force électro-magnétique est combattue par l'action directrice que la terre exerce sur l'aiguille, et pour observer l'effet seul de cette puissance nouvelle qui agit d'une manière si énergique et en même temps si singulière, il est nécessaire de neutraliser la force terrestre : c'est ce que l'on peut faire très simplement, en disposant, par exemple, un barreau horizontal, dans le plan du méridien magnétique, et sur le prolongement de l'aiguille, on découvre alors le vrai caractère de la force électro-magnétique : on voit qu'elle n'est ni une force attractive, ni une force répulsive; mais une force *directrice* qui tourne toujours l'aiguille perpendiculairement au fil conducteur, sans attirer un pôle de préférence à l'autre, c'est à dire que la ligne des pôles est toujours *en croix* avec le cou-

rant. Pour prendre une idée plus nette de cette direction, concevons un cylindre creux, d'une longueur quelconque, et, par exemple, d'un pied de diamètre; suivant l'axe de ce cylindre, imaginons un fil conducteur traversé par le courant, et sur sa surface une aiguille aimantée qui puisse se mouvoir librement dans tous les sens : l'effet de la force électro-magnétique sera tel, que l'aiguille se mettra toujours tangentiellement au cylindre, et tranversalement à ses arêtes; ou, en d'autres termes encore, si du milieu de l'aiguille on abaisse une perpendiculaire sur le courant, l'aiguille, dans son équilibre sous l'influence de la force électro-magnétique, sera elle-même perpendiculaire au plan qui passe par cette perpendiculaire et par le courant. Ce n'est pas assez de définir ainsi la direction de l'aiguille, il faut encore assigner la position de ses pôles, déterminer de quel côté se trouve le pôle boréal, de quel côté le pôle austral, soit que le courant se propage dans un sens ou dans l'autre. Dans les premiers temps, on éprouvait de grands embarras pour exprimer en peu de paroles ces rapports de position et de direction qui se compliquent de mille manières : mais Ampère a levé toutes ces difficultés au moyen d'une comparaison qui semblera peut-être aussi bizarre qu'elle est ingénieuse. Ampère ne se contente pas de donner une direction au courant, il lui donne encore une *tête*, des *pieds*, une *droite* et une *gauche*; il en fait un homme. Concevons dans une portion quelconque du fil conducteur une petite figure d'homme couchée dans le sens de la longueur, les pieds du côté du pôle zinc, et la tête du côté du pôle cuivre, de telle manière que, d'après notre définition précédente, le courant entre par les pieds et sorte par la tête; concevons que cette figure ait *toujours* la face tournée vers le milieu de l'aiguille sur laquelle agit le courant : alors l'effet est tel que l'aiguille se trouve *en croix*, comme nous venons de le voir, et toujours son pôle austral vers la gauche de la petite figure d'homme ; ce que nous exprimons en disant qu'elle se tourne en croix avec le courant,

son pôle austral à gauche. Cette espèce de formule singulière offre une image facile qui supplée à beaucoup de paroles ; ceux qui voudront l'appliquer à toutes les expériences que nous avons déjà citées, n'auront pas besoin d'un long exercice pour reconnaître qu'elle est en même temps très fidèle et très commode.

235. *L'intensité de l'action du courant est en raison inverse de la simple distance.* — Cette loi fondamentale a été démontrée par MM. Biot et Savart, au moyen d'un appareil qui est représenté dans la figure 355 ; *a b* est une aiguille aimantée, semblable aux petites aiguilles d'épreuve dont nous avons parlé (180); elle est suspendue à un fil de cocon au moyen d'une petite chape de cuivre, et se trouve abritée de l'agitation de l'air par une cloche de verre. L'action de la terre est neutralisée par un barreau convenablement placé, en sorte que cette aiguille n'a plus de force directrice; elle est indifférente et prête à obéir sans résistance aux nouvelles forces que l'on fait agir sur elle ; *c d* représente la section d'un gros fil de cuivre de huit ou dix pieds de longueur, tendu verticalement et traversé par un courant, tantôt de haut en bas, tantôt de bas en haut. Pour fixer les idées, nous supposerons que le courant est ascendant : ce fil, toujours vertical, peut être porté à diverses distances de l'aiguille, qui, dans toutes ses positions, correspond sensiblement au milieu de sa longueur. D'après la loi que nous venons d'indiquer, l'aiguille se met en croix avec le courant, le pôle austral à gauche, comme le représente la figure; mais, pour peu qu'on l'écarte de cette position, elle y revient par des oscillations isochrones, dont la durée dépend de l'énergie de la force électro-magnétique. Le nombre des oscillations faites dans un temps donné, la distance du courant et l'intensité de la force qu'il exerce, sont donc trois choses liées entre elles.

Dans une première expérience, soit *d* la distance du courant au milieu *m* de l'aiguille, *e* l'intensité de la force qu'il

exerce, et n le nombre des oscillations qui s'exécutent dans un temps donné, dans une minute par exemple :

Dans une deuxième expérience, soient d', e' et n' les quantités analogues.

Les intensités des forces qui produisent des oscillations isochrones étant toujours entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations exécutées dans le même temps, nous aurons (179) :

$$\frac{e}{e'} = \frac{n^2}{n'^2}$$

Ainsi, après avoir observé les oscillations, il est facile de comparer les intensités des forces. C'est par des comparaisons de cette espèce, pour des distances comprises entre 15 et 120 millimètres, et en prenant les précautions convenables pour obvier aux variations de la pile, que MM. Biot et Savart ont reconnu qu'en effet *l'intensité de la force électro-magnétique est en raison inverse de la simple distance.*

Mais il ne faut pas perdre de vue que, d'après la disposition de l'appareil, le courant est rectiligne et d'une longueur que l'on peut regarder comme indéfinie par rapport à la longueur de l'aiguille, et surtout par rapport à sa distance; c'est sous ces conditions seulement que la loi est vraie. M. de Laplace a démontré que la force électro-magnétique élémentaire, c'est-à-dire celle qui est exercée par une seule section du courant, est *en raison inverse du carré de la distance*, comme toutes les autres forces connues, et proportionnelle au sinus de l'angle formé par la direction du courant et par la ligne menée du milieu de cette section au milieu de l'aimant. En effet, en calculant d'après ce principe la somme de toutes les actions élémentaires qui sont exercées sur une petite aiguille par un courant rectiligne indéfini, on trouve que l'intensité de cette résultante totale doit diminuer, comme l'expérience l'indique, c'est-à-dire en raison inverse de la simple distance.

Il résulte encore, de cette même loi de la force élémentaire, que l'intensité de l'action d'un courant angulaire indéfini, tel que *e m f* (*fig.* 355), sur une aiguille *ab*, est en raison inverse de la distance *a m*, comme celle d'un courant rectiligne, mais qu'elle est proportionnelle à la tangente de la moitié de l'angle *e m z*; ainsi, en prenant pour unité l'intensité de l'action de *c d* sur l'aiguille *ab*, l'intensité de l'action de *e m f* serait représentée par :

$$tang\ \frac{1}{2}\ emz.$$

C'est ce que M. Biot a aussi vérifié par l'expérience; et l'on voit que, si le courant *e m f* se redresse au point de se confondre avec *c d*, il arrive que l'angle *e m z* étant alors un angle droit, la tangente de $\frac{1}{2}$ *e m z* devient égale à l'unité, comme cela doit être.

236. *Conditions d'équilibre d'une aiguille aimantée soumise à l'action d'un courant rectiligne indéfini.* La loi précédente n'est vraie qu'à partir d'une distance qui est au moins cinq ou six fois plus grande que la longueur de l'aiguille. Pour de moindres distances les phénomènes se présentent sous un autre aspect: soit, par exemple *ab* (*fig.* 356) les deux pôles d'une aiguille horizontale, *a c b d*, le cercle qu'ils peuvent décrire, et *ll'* une perpendiculaire élevée sur le milieu *m* de l'aiguille, et prolongée indéfiniment des deux côtés. Voici ce que l'on observe lorsqu'on fait agir sur l'aiguille un courant vertical indéfini, que pour plus de simplicité nous supposerons toujours ascendant, c'est-à-dire s'élevant au-dessus du plan de la figure.

1° Lorsque le courant se trouve sur quelque point de la circonférence *abcd*, il ne tend plus à mettre l'aiguille en croix avec lui, il la laisse parfaitement en repos, et ne la fait tourner ni dans un sens ni dans l'autre.

2° Lorsque le courant est dans le *quadran amc*, il attire à lui le pôle austral jusqu'au contact; au contraire il attire à lui le

pôle boréal quand il est dans le *quadran bmc* : dans les *quadrans amd* et *bmd* il produit des effets inverses. Par conséquent, l'équilibre est instable lorsque le courant est sur *mc*, et il est stable quand il est sur *md* : tandis qu'au contraire on observe la stabilité sur *cl*, et l'instabilité sur *dl'*.

Dans un Mémoire lu à l'Académie des Sciences en 1822, et imprimé par extrait dans les *Ann. de Chimie* (t. 21, p. 77), j'ai analysé ces phénomènes et tous ceux qui dépendent des renversemens d'action à petite distance, soit sur une aiguille mobile autour de son centre, soit sur une aiguille mobile autour d'un point quelconque. Il résulte des expériences et du calcul que tous ces phénomènes peuvent être expliqués au moyen du principe suivant que je me borne à énoncer ici : l'action qui s'exerce entre un courant rectiligne indéfini et le pôle d'un aimant forme un système de deux forces parallèles égales et contraires composant une couple ; ces forces sont perpendiculaires au courant et perpendiculaires à la plus courte distance du courant au pôle de l'aimant, et leur direction est telle que le pôle austral est toujours poussé à gauche et le pôle boréal toujours à droite ; l'intensité du courant est en raison inverse de la distance du courant au pôle de l'aimant.

Ce même principe explique pareillement tous les phénomènes d'équilibre que présentent les aiguilles soumises à des conditions quelconques, comme les aiguilles flottantes à la surface des liquides, ou celles qui se meuvent autour d'un point ou d'un axe quelconque.

237. *Multiplicateur* ou *galvanomètre*. — Peu de temps après la découverte de M. OErsted, M. Schweiger imagina le *galvanomètre*, que l'on appelle aussi *multiplicateur*, parce qu'il multiplie en effet la force électro-magnétique. Cet instrument, qui est d'une sensibilité merveilleuse pour découvrir les moindres traces de l'électricité en mouvement, repose sur ce fait, qu'un courant circulaire ou polygonal, ou ayant en général une forme rentrante quelconque, agit par

toutes ses parties pour diriger, dans le même sens, une aiguille aimantée qu'il enveloppe de toutes parts, et ce fait n'est qu'une conséquence de la proposition générale que nous avons établie (204). En effet, toutes les parties du courant qui parcourt par exemple les côtés du carré *pqron* (*fig.* 357) agissent de la même manière sur une aiguille *a b* mobile autour du centre de la figure, et qui peut se tourner perpendiculairement à son plan : le côté *n o* tend à tourner le pôle austral en avant de la figure, et le pôle boréal derrière; il en est de même du côté *q r*, du côté *o r* et du côté *p q*. Ainsi, l'aiguille devra se tourner avec beaucoup d'énergie perpendiculairement au plan du courant, le pôle austral en avant. Un deuxième circuit de même intensité, allant dans le même sens, produit sur elle un effet égal; il en serait de même d'un troisième, d'un quatrième, d'un centième; donc, un fil conducteur enroulé sur lui-même et formant cent tours, doit, quand il est traversé par le même courant, produire un effet cent fois plus grand qu'un fil d'un seul tour : seulement, il faut que les fluides parcourent toutes les circonvolutions du fil sans passer latéralement d'un contour à l'autre; c'est une condition facile à remplir. On prend pour cela un fil d'argent ou de cuivre rouge de quinze ou vingt mètres de longueur, de quelque fraction de millimètres d'épaisseur, et revêtu d'un fil de soie dont les tours sont très serrés; on l'enroule sur un petit cadre en bois ou en métal, à peu près comme du fil sur une bobine; seulement, on laisse libre 1 ou 2 mètres de longueur à chaque extrémité, c'est ce qu'on appelle *les deux fils du multiplicateur*; le courant doit entrer par l'un et sortir par l'autre : l'aiguille aimantée qui doit servir d'index est suspendue à un fil de coton, et tout l'appareil est recouvert d'une cloche qui le garantit des agitations de l'air. Lorsqu'on veut faire une expérience, on tourne le cadre dans la direction du méridien magnétique : l'aiguille est alors dans le plan du cadre, et l'effet du courant la dévie de cette position d'un angle

plus ou moins grand, suivant qu'il est plus ou moins énergique; dans cette position, la force électro-magnétique est combattue par la force magnétique de la terre, qui agit incessamment sur l'aiguille pour la ramener dans le méridien magnétique.

Ce premier multiplicateur est déjà très sensible, mais Nobili a rendu sa sensibilité incomparablement plus grande en employant, au lieu d'une seule aiguille, un système de deux aiguilles compensées. En effet, si les deux aiguilles *ab* et *a'b'*, (*fig.* 256 et 358) ont leurs pôles opposés l'un à l'autre, de manière que leur ensemble ne conserve plus qu'une force directrice très faible, et qu'on les dispose l'une dans l'intérieur du circuit et l'autre à l'extérieur, il est facile de voir que le courant agit sur l'une et sur l'autre pour les faire tourner dans le même sens; ainsi, l'action du courant est presque doublée, et, comme d'une autre part la force directrice est réduite à sa centième ou à sa millième partie, il en résulte que rien ne limite la sensibilité d'un *galvanomètre* compensé.

On comprend toutefois que par la réaction des aiguilles, leur état magnétique changeant d'un instant à l'autre, la force directrice et par conséquent la sensibilité du galvanomètre est elle-même changeante.

Pour lier entre elles les aiguilles de la manière la plus fixe, on se contente en général de les planter dans un brin de paille bien droit, ou de les attacher par un fil de métal.

L'aiguille supérieure se meut sur un cadran divisé en 360 degrés, la ligne 0 et 180 correspondant à la direction du fil sur le cadre de telle sorte que les aiguilles soient bien exactement parallèles au fil lorsqu'elles sont au zéro, c'est à dire dans leur position d'équilibre. La déviation augmente avec l'intensité du courant, mais l'on comprend qu'elle ne peut en aucune façon être proportionnelle à cette intensité.

La figure 359 représente un galvanomètre complet, et la

figure 360 représente séparément le cadre sur lequel le fil est enroulé.

Dans plusieurs expériences il est quelquefois utile d'employer un *galvanomètre différentiel*: on appelle ainsi un galvanomètre composé avec deux fils parfaitement égaux pour leur longueur, leur diamètre et leur conductibilité; ces deux fils sont enroulés simultanément sur le cadre, et, lorsqu'on fait passer par chacun d'eux des courans opposés, on n'observe sur les aiguilles que la différence de leurs actions, en sorte que l'instrument reste au zéro lorsque les courans sont parfaitement égaux.

Le galvanomètre sert, comme nous le verrons plus tard, à une foule d'expériences remarquables ; mais, si l'on veut dès à présent donner une idée de sa sensibilité, il suffit par exemple de plonger les extrémités des deux fils dans de l'eau acidulée, alors on verra un courant agiter les aiguilles ; on peut encore sur la plaque de cuivre *a b* (*fig.* 361) mettre une feuille de papier mouillée, et sur le papier une lame de métal quelconque *c d* ; alors, en mettant l'un des fils *p* du galvanomètre en contact avec la plaque *a b* et l'autre fil *n* en contact avec la plaque *c d*, on aura presque toujours un courant plus ou moins énergique : en mouillant le papier avec de l'eau un peu acide ou un peu alcaline, le courant prend une bien plus grande énergie. Nous verrons plus loin que cette action est due plutôt à l'action chimique qu'au simple contact des métaux différens.

Il sera toujours facile par le sens du mouvement des aiguilles de reconnaître dans quel sens marche le courant.

238. *De l'aimantation par le courant de la pile et par l'électricité ordinaire.* Le courant électrique n'agit pas seulement sur le magnétisme libre, mais il est capable de décomposer les magnétismes naturels de tous les corps magnétiques, et d'aimanter avec autant de puissance que les plus forts aimans. Pour montrer l'action du courant sur le fer doux, il suffit de plonger dans de la limaille une portion du fil qui joint les

deux pôles de la pile, comme l'a fait M. Arago; à l'instant la limaille s'enroule autour du fil et y reste adhérente tant que passe le courant, mais elle se détache et tombe aussitôt que le circuit est rompu. De petites aiguilles d'acier présentées au courant s'y attachent pareillement, en se mettant en croix avec lui; puis elles conservent leur magnétisme quand on les sépare. Cependant, d'après ce que nous avons vu, pour donner au courant toute son efficacité, il est évident qu'il faut le faire passer transversalement autour des aiguilles, ou, pour mieux dire, autour de chacune de leurs sections. On y parvient de la manière suivante:

On enroule un fil de métal en *hélice*, sur un tube de verre (*fig.* 362), on place l'aiguille dans ce tube, et l'on fait passer le courant de l'une à l'autre extrémité du fil de l'hélice : un seul instant suffit pour qu'il développe tout le magnétisme qu'il est capable de développer dans ces circonstances ; car, après un contact qui n'a que la durée de l'étincelle, l'aiguille disposée dans le tube se trouve aimantée complètement. La rapidité ou plutôt l'instantanéité avec laquelle le courant peut vaincre la résistance de la force coercitive est un phénomène très remarquable.

On distingue deux espèces d'hélices : l'hélice *dextrorsùm* (*fig.* 362), dans laquelle le fil s'enroule vers la *droite*; et l'hélice *sinistrorsùm* (*fig.* 363), dans laquelle il s'enroule vers la gauche, en supposant toutefois qu'on les tienne de la même manière ; mais, pour en donner une idée plus juste, il suffit de dire que le *tire-bouchon* ordinaire et toutes les vis sont des hélices *dextrorsùm*.

Dans l'hélice *dextrorsùm* le pôle boréal de l'aiguille est toujours à l'extrémité par laquelle entre le courant, ou bien à l'extrémité positive du fil; et dans l'hélice *sinistrorsùm*, au contraire, c'est le pôle austral de l'aiguille qui se trouve à l'extrémité positive.

Lorsqu'on fait, sur le même tube, plusieurs hélices contraires à la suite l'une de l'autre, l'aiguille offre alors, dans

son magnétisme, *un point conséquent* à la jonction des deux hélices; ainsi, chacune d'elles agit encore comme si elle était seule.

Avec une hélice deux fois renversée (*fig.* 364), on aurait deux points conséquens, et ainsi de suite. Si l'on faisait de la sorte une hélice à *pas* très petits, et composée alternativement d'un tour *dextrorsùm* et d'un tour *sinistrorsùm*, on produirait sur l'aiguille aimantée une distribution de magnétisme très singulière; ou plutôt l'effet définitif serait tel qu'elle semblerait avoir conservé son état naturel.

L'aimantation par l'électricité ordinaire donne naissance à plusieurs phénomènes curieux que nous allons examiner.

1° Le courant *direct* que l'on obtient en faisant communiquer les conducteurs avec les coussins ne produit que de très faibles effets, lorsqu'il passe simplement par un fil droit. Les aiguilles, même très fines, que l'on expose transversalement à une petite distance de ce fil, ne s'aimantent pas quand le courant est *continu*, mais elles commencent à prendre des quantités sensibles de magnétisme lorsqu'on fait passer le courant par petites étincelles; leur magnétisme augmente quand les étincelles deviennent plus fortes et partent de plus loin; enfin, l'action du courant de la machine, comme celle du courant de la pile, s'augmente au moyen des hélices; alors, de vives étincelles produisent beaucoup d'effet sur les aiguilles qui sont dans le tube de l'hélice, et même M. Ridolfi est parvenu, par ce moyen, à développer du magnétisme avec un courant continu.

2° Les décharges des bouteilles de Leyde et des batteries ont une puissance magnétique considérable, soit qu'elles traversent des fils droits, soit qu'elles traversent des hélices à pas plus ou moins serrés (*fig.* 362, 363 et 364). D'abord on avait obtenu, par l'un et l'autre moyen, des résultats identiques à ceux que produit la pile : on avait trouvé que, près des fils droits, les aiguilles transversales s'aimantent, le pôle austral à gauche; et que, dans les tubes des hélices,

elles s'aimantent, le pôle austral à l'extrémité négative pour les hélices *dextrorsùm*, et à l'extrémité positive pour les hélices *sinistrorsùm*. C'est en effet ce qui arrive assez souvent; mais M. Savary a découvert plusieurs phénomènes remarquables, qui semblent établir une différence fondamentale entre le courant continu de la pile et les *chocs électriques* des batteries (*Ann. de Chimie*. t. XXXIV).

Quand le choc est transmis par *un fil droit*, des aiguilles égales, parallèles, placées transversalement du même côté du fil et à des distances différentes, ne sont point aimantées dans le même sens : les unes sont aimantées *positivement*, c'est-à-dire que leurs pôles sont disposés comme ceux d'une aiguille aimantée d'avance, qui serait libre de se mouvoir sous l'action d'un courant paisible et continu passant par le fil; tandis que les autres sont aimantées *négativement*, c'est-à-dire en sens contraire des premières.

M. Savary a reconnu que ces alternatives, et les distances auxquelles elles se manifestent, dépendent, pour ainsi dire, de tous les élémens qui concourent au phénomène, savoir : de l'intensité de la décharge, de la longueur du fil tendu en ligne droite, de son diamètre, de l'épaisseur des aiguilles et de leur force coercitive. En général, les fils très fins, et les forces coercitives très faibles, présentent des alternatives moins nombreuses; souvent même, avec ces conditions, l'aimantation est toujours positive, et les périodes ne sont plus marquées que par des différences d'intensité.

Quand le choc est transmis par des *fils roulés en hélice* sur des tubes de verre ou de bois, il exerce encore des effets analogues sur des aiguilles successivement placées dans l'axe des tubes; alors, la seule variation d'intensité dans la charge de la batterie peut avoir une grande influence.

Enfin, M. Savary a constaté, par de nombreuses expériences, un autre phénomène qui me semble mériter toute l'attention des physiciens. La quantité de magnétisme que prend une aiguille sous l'influence d'une décharge électrique,

et même le sens de son aimantation, dépendent de la nature et des dimensions des corps qui la touchent ou qui l'enveloppent. Dans une hélice pareille aux précédentes, et traversée par une décharge électrique, une aiguille ne peut plus prendre de magnétisme quand elle est enveloppée d'un cylindre de cuivre assez épais : à mesure que l'épaisseur diminue, le magnétisme devient sensible, et pour une épaisseur assez petite, il devient plus considérable qu'il ne serait pour une aiguille nue et isolée dans l'axe de l'hélice. L'étain, le fer et l'argent, placés autour de l'aiguille, lui donnent des propriétés analogues, c'est-à-dire qu'en feuilles très minces ils la rendent plus apte à recevoir le magnétisme, et qu'en cylindres suffisamment épais ils lui ôtent tout à fait la propriété d'être aimantée par le choc électrique. Des cylindres de limaille métallique ne produisent pas cet effet, tandis que des couches concentriques, alternativement métalliques et non métalliques, le produisent; d'où il semble résulter que les solutions de continuité perpendiculaires à l'axe de l'aiguille ou à l'axe des cylindres ont une grande influence sur leurs propriétés.

239. *De la rotation des aimans par l'influence des courans.* — Le phénomène curieux de la rotation des aimans par l'action des courans a été indiqué par le Dr Wollaston, et démontré par M. Faraday, à une époque où l'on n'avait encore que des notions très incomplètes sur les forces électro-magnétiques.

Voici d'abord le détail des expériences : une large éprouvette de verre *v v'* (*fig.* 365) est remplie de mercure jusqu'à une petite distance de ses bords; un aimant cylindrique *a b*, lesté avec un contre-poids de platine *p*, se tient debout dans le mercure de manière que son pôle *a* s'élève de quelques millimètres au-dessus du niveau (cet aimant est représenté un peu plus en grand dans la *figure* 367); une tige *t*, que l'on peut élever ou abaisser à volonté au moyen d'une vis de pression, vient plonger dans le mercure

par son extrémité inférieure, tandis qu'elle communique, par son autre extrémité, avec un conducteur en cuivre *c* qui communique lui-même avec l'un des pôles de la pile; enfin, le conducteur *c'*, qui tient à l'autre pôle, passe sur le bord de l'éprouvette et plonge dans le mercure très près de son contour extérieur. On lui donne la forme d'un anneau pour que tout soit symétrique. Dès que la communication est établie, l'aimant tourne dans le même sens d'un mouvement plus ou moins rapide, et fait des révolutions successives autour de la tige *t;* il a bien quelque tendance à venir la toucher et à tourner alors plus rapidement, mais, avec quelques soins, il est facile de l'ajuster pour qu'il se maintienne à distance; cependant, il faut un puissant appareil pour que la rotation soit régulière et rapide.

Mais l'on peut disposer l'expérience d'une autre manière qui donne toujours une grande vitesse, même avec des piles ordinaires de 10 à 12 couples. Cette disposition est représentée dans la figure 366. La petite cavité qui se trouve à l'extrémité de l'aimant, et par laquelle il peut se visser sur le contre-poids de platine, forme une espèce de petite coupe *g* (*fig.* 367) que l'on remplit de mercure; on abaisse la pointe de la tige *t* de manière qu'elle plonge dans ce mercure sans toucher à l'aimant, qui conserve ainsi toute sa mobilité; ensuite on établit les communications avec les deux pôles de la pile comme dans l'expérience précédente; alors, l'aimant tourne sur lui-même comme une toupie, et avec une grande vélocité.

Dans le premier mode d'expérience, le sens du mouvement s'établit toujours comme si le pôle austral était poussé à la gauche du courant; dans le second mode, le pôle est immobile, mais le mouvement s'accomplit comme dans le premier cas, quant à sa direction. Nous verrons dans le chapitre troisième l'explication de ces phénomènes.

CHAPITRE II.

Action de la terre et des aimans sur les courans.

240. *Direction des courans par l'influence du magnétisme de la terre.* — Quand on eut constaté l'action des courans sur les aimans, on ne pouvait pas douter qu'il n'y eût, de la part des aimans, une réaction égale capable de diriger les courans et de les mouvoir de diverses manières. Entre tous ces phénomènes inverses des précédens, ceux qui devaient résulter de l'action magnétique de la terre se présentaient comme les plus curieux à examiner, et l'on essaya en effet de disposer des courans mobiles pour étudier les modifications qu'ils éprouveraient en les abandonnant comme des boussoles à l'influence du magnétisme terrestre. Ces premiers essais ne donnaient point de résultats satisfaisans, parce qu'il était difficile alors de donner au courant toute la mobilité désirable. Cependant, Ampère parvint bientôt à lever toutes ces difficultés par un mode ingénieux de suspension qui s'applique avec avantage à tous les courans mobiles. Nous allons donner une idée de cet ajustement.

La figure 368 représente deux colonnes verticales en cuivre v et t, fixées sur un pied de bois ; à leur extrémité supérieure, elles se recourbent *en potence* et viennent se terminer par les deux coupes x, y, dont les centres sont dans la même verticale ; les parties de ces colonnes, qui semblent se toucher, sont séparées l'une de l'autre par des substances isolantes : ainsi, quand leur pied communique aux deux pôles de la pile par un moyen que nous allons indiquer, il est évident que les fluides électriques arrivent, l'un dans la coupe x, l'autre dans la coupe y, et qu'il n'y a point de

courant produit, à moins que l'on n'établisse une communication entre ces deux coupes, que l'on peut appeler l'une la *coupe positive*, et l'autre la *coupe négative*, suivant la nature du fluide qu'elles reçoivent.

Rien ne paraît plus simple que de faire arriver l'électricité au pied des colonnes : cependant, comme il est nécessaire de changer souvent les communications, de pouvoir instantanément les supprimer ou les établir dans un ordre inverse, sans rien déranger à l'appareil, Ampère a imaginé une disposition ingénieuse, qui remplit cet objet d'une manière très commode.

r et r' (*fig.* 369) sont deux rainures de quelques lignes de profondeur, creusées dans l'épaisseur d'une plaque de bois (*fig.* 370) qui peut se poser sur les tables des divers appareils électro-magnétiques ; v et v', t et t' sont quatre cavités, creusées de la même manière et communiquant diagonalement par deux lames de cuivre, savoir, par $l\,l'$, qui va de v en v', et par mm', qui va de t en t'; au point de croisement, ces lames sont séparées par une petite bande de substance non conductrice, afin que le courant ne puisse jamais passer de l'une à l'autre. Les deux rainures et les quatre cavités sont remplies de mercure; mais, préalablement, elles ont été mastiquées avec de la résine, afin que le courant ne puisse pas s'établir au travers du bois qui les sépare.

Cela posé, concevons que l'on plonge le fil positif de la pile dans la rainure r et le fil négatif dans la rainure r'; il est évident que les fluides ne pourront passer ni dans l'une ni dans l'autre des quatre cavités v, v', t, t'; mais si l'on établit en même temps une communication de r à v, et une autre de r' à t, le fluide passera de v à v' par la lame ll', et de t à t' par la lame mm'; ainsi, la bande b', qui communique à v', sera positive, et la bande b, qui communique à t, sera négative. Au contraire, si, en reprenant les choses au premier état, on établit des communications de r à t' et de r' à v', la bande b' sera négative, et la bande b positive : or, ces deux

bandes étant destinées à produire le courant, lorsqu'on les fait communiquer ensemble par un circuit métallique quelconque, il est clair que le courant traversera le circuit dans un sens ou dans l'autre, suivant que l'on mettra deux arcs conducteurs de *r* à *v* et de *r'* à *t*, ou qu'on les mettra de *r* à *t'* et de *r'* à *v'*. Si maintenant on jette les yeux sur la pièce à *bascule* (*fig.* 370), on verra bientôt tout le mécanisme dont il nous reste à parler. Cette pièce est en bois et peut tourner autour de l'axe *aa'* qui s'ajuste dans les trous *oo'* sur les pieds *p* et *p'*; elle porte quatre arcs conducteurs de métal, deux d'un côté en *c* et *c'*, et deux autres pareils de l'autre côté en *d* et *d'*. Quand elle est en place, les extrémités de l'arc *c* répondent à la rainure *r* et à la cavité *v*, celles de *c'* à la rainure *r'* et à la cavité *t*, celles de *d* à *r* et à *t'*, celles de *d'* à *r'* et à *v'*; leur longueur est telle que, dans cette position, ils ne touchent point au mercure ; mais, quand on fait tourner la bascule pour plonger les arcs *c* et *c'*, le courant passe de *b'* à *b*, et, quand on la fait tourner pour plonger les arcs *d* et *d'*, le courant passe en sens inverse de *b* à *b'*.

Cet ajustement pris dans son ensemble s'appelle une *bascule*; il est établi au pied des deux colonnes *v* et *t* de la figure 368 : seulement, nous avons supprimé la pièce mobile, qui aurait empêché de voir les positions relatives des rainures et des cavités. On voit que les bandes *b* et *b'* de la figure 369 viennent aboutir chacune au pied de l'une des colonnes, et que c'est par elles que le fluide passe pour arriver aux coupes *x* et *y'*: en faisant plonger la bascule dans un sens ou dans l'autre, on rend chacune des coupes alternativement positive et négative.

Cela posé, examinons le fil de cuivre plié en cercle de la fig. 371 qui est destiné à devenir un courant circulaire mobile : les extrémités de ce fil sont liées entre elles, mais séparées l'une de l'autre par une substance isolante ; elles sont recourbées en crosse de telle manière qu'elles correspondent aux deux coupes *x* et *y* de la figure 368 ; enfin, elles

portent deux pointes d'acier, l'une qui doit poser sur la lame de verre un peu creusée qui forme le fond des coupes, et l'autre qui doit simplement plonger dans l'autre coupe. L'eau acidulée ou plutôt le mercure dont on remplit les deux coupes achève d'établir les communications, et l'on obtient ainsi un courant circulaire doué d'une grande mobilité.

Le cercle étant mis en place dans l'appareil de la figure 368, on fait passer le courant, et l'on voit à l'instant qu'il y a une force qui le sollicite; il se tourne, il oscille, et enfin il se fixe dans une position déterminée, à laquelle il revient sans cesse lorsqu'on l'en écarte. Ensuite, lorsqu'en plongeant la bascule en sens contraire on change la direction du courant, le cercle fait une demi-révolution, vient osciller de l'autre côté, et se fixer enfin dans une position diamétralement opposée. Dans les deux cas, le plan d'équilibre où il s'arrête se trouve exactement perpendiculaire au plan du méridien magnétique. *L'équilibre stable a lieu quand, dans la partie inférieure du circuit, le courant va de l'est à l'ouest.*

Des circuits fermés, triangulaires, carrés, ou d'une autre figure quelconque, peuvent être mis en expérience sur le même appareil (*fig.* 368), et présentent les mêmes effets; ainsi, le rectangle de la fig. 372 se dirige comme le cercle précédent.

Pour que l'action de la terre se neutralise par elle-même dans un lieu quelconque, il suffit d'ajuster les fils pour avoir, de part et d'autre de l'axe de rotation, des parties symétriques que le courant traverse dans le *même sens* : par exemple, la figure 373 représente un rectangle qui n'a aucune force directrice; en effet il est facile de voir, en suivant la direction du courant sur la figure, qu'il y a toujours de part et d'autre de l'axe des forces égales qui se détruisent mutuellement, puisqu'elles tendent à produire une rotation dans le même sens.

241. *Direction des courans verticaux par l'influence de la terre.* Les phénomènes précédens ont été analysés pour la première fois dans un mémoire que je présentai à l'Institut

sur ce sujet (*Annales de Chimie et de Physique*, t. 21, p. 77), M. Aug. de la Rive avait fait de son côté des recherches analogues dont il donna connaissance très peu de temps après à la Société d'Histoire naturelle de Genève (*Bibliothèque universelle*, t. 21, p. 21). Pour bien se rendre compte de l'action de la terre, il faut examiner ses effets sur les courans verticaux et sur les courans horizontaux. Voici d'abord l'appareil qui m'a servi à ces recherches pour les courans verticaux. Il se compose de deux vases cylindriques de cuivre ; l'un supérieur, et l'autre inférieur d'un diamètre un peu plus grand (*fig.* 374). Ces vases sont percés en leur milieu d'une ouverture un peu large, pareillement cylindrique, dans laquelle passe la tige *t*, qui se termine par la coupe *c* ; la traverse *hh'* est de substance non conductrice ; elle porte en son milieu une pointe par laquelle elle repose en équilibre sur le fond de la coupe *c*, remplie de mercure. Les fils *v* et *v'* attachés à la traverse sont recourbés, pour plonger par une extrémité dans l'eau acidulée du vase inférieur ; une petite languette en métal, soudée sur le fond du premier vase, plonge dans le mercure de la coupe, pour établir une communication entre l'eau et la tige. Ainsi, le courant qui entre par le vase inférieur passe dans l'eau acidulée du vase inférieur, dans les fils verticaux, dans l'eau acidulée du vase supérieur, dans la languette, dans la coupe, et vient enfin descendre par la tige *t*.

Lorsqu'on relève l'extrémité inférieure ou supérieure de l'un des fils pour le faire sortir de l'eau acidulée, de manière que le courant passe seulement par l'autre fil, le système se dirige et vient se placer dans le plan perpendiculaire au méridien magnétique : *quand le courant est ascendant, le fil qu'il traverse se place à l'occident*, ou du moins, s'il vient à l'orient, il n'y trouve qu'une position d'équilibre instable, dont la moindre force peut le déranger : c'est le contraire quand le courant est descendant.

On voit par cette raison que les deux fils pris ensemble,

s'ils sont bien égaux, diamétralement opposés, placés à la même distance de l'axe, et traversés par des courans de même intensité, doivent former un système complètement indifférent à l'action de la terre, puisque, dans toutes les positions autour de l'axe, les deux fils sont alors sollicités par des forces parallèles égales et dirigées dans le même sens, qui ne cessent pas de se faire équilibre. Mais il n'en est plus de même lorsque les deux fils ne sont pas diamétralement opposés, ou lorsqu'il existe entre eux quelque légère différence de diamètre, de forme, de longueur, de distance à l'axe, ou de faculté conductrice qui entraîne quelque inégalité dans les momens de rotation. On peut, en variant ces diverses circonstances, faire un grand nombre d'expériences intéressantes. Pour que l'équilibre soit plus stable, on peut, sans modifier en rien les résultats, joindre les extrémités inférieures des fils par un ruban de cuivre formant un cercle parallèle aux bords du vase.

242. *Rotation des courans horizontaux par l'influence de la terre.* — L'appareil qui sert à étudier l'action des courans horizontaux est représenté dans la figure 375 ; c'est un simple vase de cuivre analogue aux précédens ; le fil horizontal *ab* terminé par les boules *c* et *d* est en équilibre stable sur sa pointe qui repose dans la coupe centrale, et deux appendices verticaux très courts plongent dans l'eau acidulée du vase. Le courant qui entre, par exemple, par la coupe, traverse en sens opposé les deux moitiés du fil pour passer dans l'eau acidulée et de là dans le métal du vase, et l'on aperçoit aussitôt un mouvement de rotation continu. La rotation se fait de l'est à l'ouest par le nord quand le courant va du centre à la circonférence, et en sens contraire quand le courant va de la circonférence au centre du fil.

Le phénomène se produit encore, quoique avec moins d'intensité, quand le courant ne passe que par l'une des moitiés du fil, l'autre moitié étant de substance non conductrice, ou cessant de plonger dans l'eau acidulée.

Mais il est évident qu'il n'y aurait plus aucun mouvement dans un fil horizontal composé de deux parties égales et traversées par le même courant, comme le représente la figure 376, quel que soit d'ailleurs l'angle des deux parties *ac* et *bc* ; car dans l'une le courant marche de la circonférence au centre *c*, et dans l'autre du centre à la circonférence, en sorte qu'elles tendent à tourner en sens contraire et composent un système indifférent : ce système toutefois tendrait à se transporter dans un sens ou dans l'autre, en suivant la direction de la ligne qui divise l'angle *acb* en deux parties égales.

D'après cette analyse des actions éprouvées de la part de la terre par les courans verticaux et horizontaux, il est facile de voir que, si le système représenté dans la fig. 377 tourne d'un mouvement continu lorsqu'on l'ajuste sur l'appareil de la fig. 374, c'est par l'effet de ses branches horizontales, et aucunement par l'effet de ses branches verticales qui composent un système indifférent.

243. *Direction des courans par les aimans.* — Ce que nous avons dit sur la direction que le magnétisme de la terre imprime aux courans mobiles suffit pour indiquer la plupart des effets qui seront produits par l'action des aimans; mais, comme la terre agit sans cesse, il faudra, pour ne pas compliquer les expériences, employer des appareils dans lesquels son influence se détruise d'elle-même. Par exemple, le double rectangle de la figure 373 étant suspendu dans l'appareil de la figure 368, on verra qu'il reste en équilibre dans toutes les positions, et, en approchant l'un des pôles d'un aimant, il sera facile de l'attirer, de le repousser, et de lui imprimer des mouvemens dans tous les sens. Lorsqu'on fait ces expériences, on est frappé d'abord des alternatives d'attraction et de répulsion qui se manifestent pour des positions de l'aimant très peu différentes : en portant l'un de ses pôles un peu plus à droite ou un peu plus à gauche, en l'approchant ou en l'éloignant d'une quantité très petite, on observe à l'instant un renversement dans l'action. Tous

ces mouvemens si divers et si compliqués en apparence se déduisent du principe général que nous avons énoncé (236). Pour les expliquer, il suffit d'analyser les couples différentes qui résultent de l'action de chaque pôle sur les diverses parties du courant, et d'observer en même temps la disposition de ces forces par rapport à l'axe de rotation, et les bras de leviers par lesquels elles agissent; c'est un problème dont les conditions peuvent être variées à l'infini.

On doit à M. de La Rive plusieurs expériences ingénieuses par lesquelles il fait voir que des courans très faibles peuvent être dirigés par les aimans, ou même par l'action magnétique de la terre. Ces petits appareils sont des courans flottans, dont on peut varier la forme à volonté; nous en avons représenté deux dans les figures 378 et 379. Dans un morceau de liège, destiné à flotter sur un large vase d'eau acidulée, on fait passer une petite feuille de zinc *z*, qui est soudée en *s* à un ruban ou à un fil de cuivre *c*; après avoir décrit une circonférence dans la figure 378, et diverses circonvolutions dans la figure 379, ce fil de cuivre vient à son tour passer dans le liège, et plonger dans l'eau acidulée à une petite distance de la feuille de zinc. Dès que l'appareil est sur l'eau, le courant s'établit dans la direction des flèches, et il est assez sensible pour être dirigé par la terre, et à plus forte raison pour être attiré ou repoussé par les aimans. Par exemple, lorsqu'on présente le pôle boréal d'un aimant au cercle de la figure 378, à une certaine distance, on le voit se tourner sur lui-même d'une certaine manière, puis s'avancer vers le pôle, s'engager sur l'aimant, arriver jusqu'au milieu et, là, s'arrêter après diverses oscillations. Si l'on avance ou si on recule l'aimant, le cercle avance ou recule pour garder sa position, qui est en effet la seule, comme on peut le voir aisément, dans laquelle il se trouve en équilibre stable.

244. *Rotation des courans par les aimans.* — Avec le pôle d'un aimant convenablement disposé relativement au

courant horizontal de la figure 375, on peut produire à volonté tous les phénomènes qui résulteraient de l'action magnétique de la terre dans tous les climats, depuis l'équateur jusqu'aux pôles.

1° Le pôle boréal d'un barreau étant présenté *au dessous* de l'appareil et agissant ainsi dans le même sens que le magnétisme terrestre, on observe une grande accélération de vitesse dans la rotation.

2° Le même pôle étant au contraire présenté *au dessus* de l'appareil, son action est inverse de celle de la terre, et l'on peut, en variant les distances, faire tour à tour prédominer la force de l'aimant ou celle du globe terrestre.

3° Le pôle austral de l'aimant agit toujours en sens contraire du pôle boréal; et, comme l'action de chacun des pôles détermine des rotations opposées, en passant au dessus ou au dessous du plan horizontal *ab*, il est évident que, dans ce plan lui-même, l'action de chacun est exactement nulle. On peut ainsi faire avec cet appareil un grand nombre d'expériences, dont il sera facile d'expliquer toutes les particularités.

Les expériences que l'on peut faire avec les courans verticaux, ascendans ou descendans, de la figure 374, ne sont ni moins nombreuses, ni moins variées, ni moins faciles à expliquer. Par exemple, il est évident que les deux courans diamétralement opposés, qui forment un système indifférent sous l'influence du magnétisme terrestre, forment au contraire un système capable de recevoir un mouvement de rotation très rapide sous l'action de l'un des pôles d'un aimant. Concevons, en effet, le cylindre indéfini que décrivent en tournant les deux fils verticaux *v*, *v'* et leurs prolongemens : lorsqu'un pôle austral sera placé quelque part dans l'intérieur de ce cylindre, soit au dessus, soit au dessous des courans, il produira partout une rotation continue dans un sens ou dans l'autre, suivant que le courant sera ascendant ou descendant. Un pôle boréal placé seul produira aussi le

même phénomène, toujours en sens inverse, de telle sorte qu'on n'aurait plus de rotation si ces deux pôles contraires agissaient en même temps dans des positions où leur énergie fût égale.

Placés au dehors du cylindre indéfini dont nous venons de parler, les pôles d'un aimant ne peuvent plus produire de rotation, mais ils impriment simplement au système mobile une direction déterminée.

Les appareils des figures 374 et 377 participent à la fois aux propriétés des branches horizontales et à celles des branches verticales, et ils éprouveront, de la part des aimans, des effets composés dont il sera facile de faire l'analyse.

On doit à M. Faraday un appareil très simple, au moyen duquel on produit aisément le phénomène de la rotation continue; il est représenté dans la figure 380 : *z z'* est un vase de zinc, percé en son milieu, et portant une petite traverse sur laquelle est soudée en *s* une tige de cuivre *s c* ; dans la coupe qui termine cette tige, on met en équilibre l'appareil de la figure 377; le mercure de la coupe et l'eau acidulée du vase, dans laquelle plonge le ruban circulaire, complètent les communications, et le courant mobile se met à tourner rapidement sous l'influence des barreaux qui sont placés en *a* au dessous du vase. On peut même donner à cet appareil assez de sensibilité pour qu'il tourne sous l'influence de la terre.

Le courant est ici produit par l'action chimique que l'eau acidulée exerce sur le zinc du vase.

245. *De quelques phénomènes que présentent les courans qui passent dans le vide ou dans les liquides.* C'est sir H. Davy qui a étudié ces phénomènes au moyen de la grande pile de la Société Royale, et nous rapporterons ici trois de ses expériences les plus remarquables.

Premièrement. On met au fond d'une soucoupe ou d'un large vase de verre une masse de mercure assez considérable, sur laquelle on verse une couche d'eau acidulée; les

deux pôles d'une pile viennent plonger verticalement dans le mercure en deux points qui soient à peu près à égale distance du centre et de la circonférence; le courant une fois établi de cette manière, on n'observe aucun phénomène particulier, mais, dès qu'on approche l'un des pôles d'un puissant aimant, le mercure semble d'abord agité et tournoyant, et bientôt après toute la masse se met en mouvement de rotation très rapide, autour de chaque fil, comme autour d'un axe : la direction de ces mouvemens est déterminée par celle du courant, par la position et par la nature du pôle magnétique qu'on lui présente. L'action est plus vive lorsqu'on fait agir deux pôles contraires d'un aimant, l'un au dessus, l'autre au dessous du mercure, et hors de l'espace qui est compris entre les fils.

Secondement. On fait passer, par le fond d'un large vase de verre, deux gros fils de cuivre qui sont partout enduits de cire, excepté à leur extrémité supérieure, et qui s'élevent perpendiculairement jusqu'à un pouce environ au dessus du fond. Ces deux fils sont à trois pouces l'un de l'autre. Le vase étant rempli de mercure, de manière que le niveau s'élève à une ou deux lignes au dessus des fils, on fait passer un courant très énergique. Alors on observe les phénomènes suivans : le mercure est fortement agité, sa surface au dessus de chaque fil s'élève en forme de petits cônes d'où s'échappent de petites ondes dans toutes les directions; le seul point sans agitation paraît être celui de la rencontre de ces ondes au centre du mercure entre les deux fils. Ensuite, lorsqu'on approche graduellement au dessus de l'un de ces cônes le pôle d'un barreau fortement aimanté, son sommet s'affaisse peu à peu, et enfin il retombe au niveau; et même, à une moindre distance, le barreau détermine une dépression du mercure et une espèce d'entonnoir mobile et tourbillonnant, dont le sommet descend presque jusqu'à l'extrémité du fil.

L'étain en fusion présente le même phénomène.

Troisièmement. Le courant qui passe dans le vide, et

dont nous avons parlé précédemment (227), peut être agité, dirigé et mis en mouvement par le pôle d'un aimant puissant. L'étincelle qui part des conducteurs de la machine semble avoir trop d'instantanéité pour obéir à l'action des aimans. Ainsi, nous ne devons pas être étonnés que les éclairs qui sillonnent le ciel pendant les orages ne soient pas sensiblement dirigés par l'action magnétique de la terre : tandis que l'électricité plus diffuse qui se manifeste dans les hautes régions de l'atmosphère par une lumière moins éclatante et moins instantanée obéit à cette influence, et semble en recevoir, non pas son mouvement, mais sa direction et son arrangement.

Nous verrons, dans la Météorologie, que cette expérience curieuse de sir H. Davy est une donnée intéressante pour expliquer les causes et les apparences des aurores boréales. Mais il reste encore des recherches importantes à faire sur les phénomènes singuliers que présentent les courans, lorsqu'ils traversent les fluides élastiques raréfiés ou les liquides conducteurs.

CHAPITRE III.

De l'action des courans sur les courans.

246. C'est à Ampère que l'on doit la découverte de l'action mutuelle que les courans exercent sur les courans, et c'est presque uniquement à ses recherches que l'on doit en même temps la connaissance des phénomènes indéfiniment variés qui en résultent, et la connaissance non moins importante des lois mathématiques qui les enchaînent. La théorie générale à laquelle il est parvenu, et qu'il a exposée dans l'un des ouvrages les plus remarquables de notre époque (*Théorie des phénomènes électro-dynamiques*, etc. Paris, 1826), n'embrasse pas seulement l'action des courans proprement dits, mais elle s'étend encore aux actions magnétiques elles-mêmes et aux actions mutuelles des courans et des aimans; elle ramène par conséquent à un même principe des phénomènes qui avaient jusqu'alors été considérés comme dépendans de forces différentes. Pour atteindre ce but, Ampère a été obligé, il est vrai, de recourir à des considérations hypothétiques sur la constitution des aimans, mais ses hypothèses sont de l'ordre de celles que les géomètres doivent admettre pour appliquer le calcul aux phénomènes physiques, elles semblent d'ailleurs avoir reçu un nouveau degré de probabilité par les découvertes récentes de M. Faraday.

Nous regrettons vivement que le cadre d'un traité élémentaire ne nous permette pas d'exposer cette théorie dans son ensemble, mais nous nous attacherons du moins à faire connaître toutes les principales expériences qui lui servent de base, en substituant autant qu'il nous sera possible un ordre logique à l'ordre mathématique adopté en dernier lieu par

Ampère, et en simplifiant les appareils pour les rendre plus intelligibles.

247. *Action des courans parallèles.* Deux courans parallèles ne peuvent pas être en présence sans exercer l'un sur l'autre une action plus ou moins vive qui dépend de leur distance, de leur intensité et de leur longueur ; en ne considérant cette action que par rapport à la direction des effets, elle est soumise à cette loi générale très simple : *Deux courans parallèles s'attirent quand ils marchent dans le même sens, et ils se repoussent quand ils marchent en sens contraire.*

C'est ce que nous allons démontrer au moyen de l'appareil suivant :

a b c d e f (*fig.* 381) est un fil de cuivre plié en rectangle dont les extrémités s'adaptent dans les deux coupes *x* et *y* qui terminent les deux colonnes *t* et *v* ; lorsque ce rectangle est en place, le courant qui entre par la colonne *t* le parcourt dans le sens des flèches pour sortir par la colonne *v* ; alors les courans de *t* et de *de* marchent dans le même sens en montant, ceux de *v* et de *bc* marchent dans le même sens en descendant, et il y a une vive attraction qui ramène sans cesse le rectangle dans la position où le côté *de* est près de *t* et le côté *bc* près de *v*; donc, *les courans qui vont dans le même sens s'attirent.*

En substituant le rectangle de la fig. 382 à celui de la figure 381, on a, dans ce rectangle et dans les colonnes, des courans qui marchent en sens contraire, et l'on observe une répulsion; donc, *les courans qui vont en sens contraire se repoussent.*

Dans ces expériences, il faut disposer les appareils pour que le mouvement du rectangle ne puisse pas être attribué à l'action de la terre à laquelle il se trouve soumis, comme nous l'avons vu précédemment.

L'intensité de ces attractions et de ces répulsions est évidemment proportionnelle à la longueur des côtés verticaux du rectangle, et au carré de l'intensité du courant qui est en

circulation dans l'appareil ; elle serait aussi en raison inverse de la simple distance, si les colonnes *t* et *v* pouvaient être considérées comme ayant une longueur infinie par rapport à la longueur des courans mobiles sur lesquels elles agissent.

Lorsqu'un fil est replié sur lui-même (*fig.* 383) de manière à donner passage à deux courans égaux et contraires, son effet attractif ou répulsif est évidemment nul, car les actions qu'il exerce soit sur des aimans, soit sur des courans, se détruisent toujours comme étant toujours égales et opposées.

248. *Action des courans sinueux.* L'action d'un courant sinueux quelconque est équivalente à celle d'un courant linéaire de même longueur et de même intensité, pourvu toutefois que ces actions s'exercent à une distance très grande par rapport à l'amplitude des sinuosités. C'est ce que l'on démontre au moyen de la colonne de la figure 384, qui est composée d'une lame de métal et d'un fil de cuivre couvert de soie, communiquant à son sommet et descendant sinueusement comme le représente la figure. Cette lame peut être placée à quelque distance de la colonne *v*, et alors, quand le courant est descendu par cette colonne, on le fait remonter par la lame pour qu'il redescende par le fil, et l'on n'aperçoit pas que ce système exerce la moindre action sur le rectangle mobile dont il est très voisin. Ainsi, la lame et le fil sinueux représentent simplement un courant ascendant et un courant descendant dont les effets se détruisent ; donc, l'action du fil sinueux est seulement équivalente à celle de la lame.

Il en résulte que l'on peut toujours remplacer un courant curviligne d'une petite étendue, ou par sa corde *a b* ou par ses deux projections *a c* et *bc* (*fig.* 385), faisant entre elles un angle quelconque. Si le fil sinueux de l'expérience précédente était roulé en spirale, son effet sur le rectangle serait encore égal à celui du courant linéaire : cependant il n'en faudrait pas conclure qu'une spirale pût toujours être remplacée par un fil, mais seulement que, dans le cas dont il s'agit, sa résultante est la même.

249. *Action des courans croisés.* Nous appelons courans *croisés* ceux qui ne sont point parallèles, soit qu'ils se trouvent dans le même plan et que leurs directions puissent se rencontrer, soit qu'ils se trouvent dans des plans différens et que leurs directions ne puissent pas se rencontrer : dans le premier cas, le *point de croisement* est le point de rencontre; dans le second cas, c'est l'un des points de la plus courte distance des deux courans. *Deux courans croisés tendent toujours à devenir parallèles pour marcher dans le même sens,* ou, en d'autres termes, *il y a attraction entre les parties qui vont l'une et l'autre en s'approchant, ou l'une et l'autre en s'éloignant du point de croisement, et répulsion entre les parties qui vont l'une en s'éloignant et l'autre en s'approchant de ce même point.*

Ainsi, *ab* et *cd* (*fig.* 386) étant deux courans dont le point de croisement est en *r*, il y a attraction entre les deux parties *ar* et *cr* parce qu'elles s'approchent de *r*, et entre les parties *br* et *rd* parce qu'elles s'en éloignent : mais il y a répulsion entre *ar* et *rd* parce que l'une s'approche et l'autre s'éloigne de *r*, et répulsion pareille entre *cr* et *rb* par la même raison.

L'appareil des figures 387 et 388 sert à démontrer cette proposition ; dans un disque de bois on a creusé deux rigoles semi-circulaires, séparées par les cloisons non conductrices *a* et *b* (*fig.* 388); au centre s'élève un pivot sur lequel repose une aiguille de cuivre *cd* très mobile, dont les bouts recourbés sont en fer et plongent dans le mercure des rigoles ; un peu au dessous de cette aiguille s'en trouve une autre *ef*, que l'on fait marcher avec la main et dont les extrémités plongent aussi dans le mercure des rigoles; le courant qui entre par la coupe *x*, passe par les deux aiguilles et va ressortir par la coupe *y*. On montre la répulsion en mettant les aiguilles dans les positions *cd* et *ef* (*fig.* 388), et l'attraction en les mettant dans une autre position quelconque où l'angle *crf* soit moindre qu'un angle droit.

Il en résulte qu'un courant angulaire *abc* (*fig.* 389) tend à se redresser, car les parties *ab* et *bc* se repoussent.

Cette répulsion ne tend pas seulement à ramener *bc* dans le prolongement de *ab*, mais elle s'exerce encore quand cette condition est remplie, c'est-à-dire *que les portions contiguës d'un même courant rectiligne se repoussent.* Cette conséquence, qui est importante dans la théorie d'Ampère, ne me paraît pas cependant démontrée d'une manière complètement satisfaisante. Voici l'appareil dont on se sert : un vase rempli de mercure est séparé en deux parties par une cloison non conductrice *ab* (*fig.* 390), un fil de cuivre couvert de soie est replié pour passer d'un compartiment à l'autre en présentant dans chaque compartiment une branche horizontale parallèle à la cloison, cette branche est revêtue de cire excepté à son extrémité où elle se recourbe un peu pour plonger dans le mercure. En faisant arriver les deux pôles de la pile dans le prolongement des deux branches du fil, on voit le fil entier qui recule, et qui semble annoncer une répulsion entre la partie du courant qui pénètre dans le fil et celle qui est encore dans le mercure. Mais l'on ne connaît pas assez le mode suivant lequel un courant passe d'un liquide dans un solide, pour que cette conséquence soit tout à fait rigoureuse, il suffirait, par exemple, qu'une portion du courant se présentât obliquement au fil pour qu'une certaine répulsion dût avoir lieu.

250. *Rotation d'un courant par l'action d'un courant.* Concevons un courant fixe indéfini *ab* (*fig.* 391), et un courant *cd*, mobile parallèlement à lui-même : le point de croisement étant en *r*, il y aura attraction dans l'angle *brd* entre les parties *rb* et *cd* qui vont l'une et l'autre en s'éloignant du sommet de l'angle ou du point de croisement : il y aura au contraire répulsion dans l'angle *ard*, parce que la partie *ar* s'approche tandis que la partie *cd* s'éloigne ; ces deux forces donnent naissance à une résultante parallèle *ab* qui tend à pousser incessamment le courant *cd* de *a* vers *b*.

Si le courant fixe *ab* est replié en cercle, il est évident alors que *cd* devra tourner indéfiniment en vertu de la même action.

C'est ce que l'on réalise dans l'appareil représenté par la figure 392.

azsb (*fig.* 392) est un ruban de cuivre couvert de soie plié en hélice et adapté autour du vase de cuivre *v*, *ci* est un conducteur communiquant au pied de la colonne à coupe *p* qui porte le fil *m*, et *d* communique au vase *v*. Si l'on met le pôle positif de la pile en *a* et le pôle négatif en *d*, après avoir établi une communication de *b* en *c*, et rempli le vase *v* d'eau acidulée, on a un courant qui marche dans l'hélice de *z* en *s* en faisant le tour du vase, et qui descend dans les branches verticales du fil, et celui-ci se met à tourner suivant *zis* : si au contraire on met le pôle positif de la pile en *b* et le pôle négatif toujours en *d*, après avoir établi une communication de *a* en *c*, alors le courant marche dans l'hélice de *s* en *z* en faisant le tour du vase, il est toujours descendant dans les branches verticales du fil qui tourne alors en sens contraire, c'est-à-dire suivant *siz*. Ce renversement suffit pour montrer que la rotation n'est pas due à l'action de la terre, car, le courant étant toujours descendant dans le fil, la terre le ferait toujours tourner dans le même sens.

On doit à M. Savary une autre conséquence du même principe : lorsque dans un vase de cuivre analogue au précédent, mais sans hélice, on dispose l'appareil de la figure 393, on observe aussi une rotation continue qui s'explique de la manière suivante : la branche verticale *n* du fil étant non conductrice, le courant descend seulement par la branche *l*, et parcourt le ruban de cuivre dans le sens *abc*, parce que ce ruban est interrompu de *c* en *a* par une lame d'ivoire ; du ruban le courant se dirige soit aux bords, soit au fond du vase, en traversant le liquide, et, ces courans partiels du liquide pouvant être considérés comme fixes par rapport au ruban mobile, on voit que celui-ci doit tourner dans le sens

cba, et qu'il tournerait encore dans le même sens si le courant passait du liquide au ruban au lieu de passer du ruban au liquide. Pour renverser le sens de rotation il faudrait interrompre le ruban à gauche de sa jonction avec *l*, au lieu de l'interrompre à droite, c'est ce qui est en effet confirmé par l'expérience. Mais, quand le ruban est continu comme dans l'appareil de la fig. 392, les courans du liquide cessent d'avoir de l'influence, ou plutôt leurs influences se détruisent parce qu'il est facile de voir qu'elles sont égales et opposées.

Théorie du magnétisme et de l'action mutuelle des aimans et des courans, en considérant les aimans comme des assemblages de courans.

251. Le principe de cette théorie consiste à regarder chaque molécule d'un aimant comme enveloppée par un courant particulier qui se meut sans cesse soit à l'intérieur, soit à l'extérieur de la molécule, formant ainsi un circuit fermé et rentrant sur lui-même, auquel, pour plus de simplicité, on peut attribuer la forme circulaire. D'après cela, si l'on conçoit dans un barreau cylindrique une simple file de molécules parallèle à l'axe, leur ensemble formera le système représenté dans la figure 394; toutes les autres files parallèles donnant naissance à des systèmes analogues, le barreau ne sera qu'un faisceau composé d'une infinité de systèmes pareils; mais il est évident que tous les circuits élémentaires contenus dans une même section perpendiculaire à l'axe pourront toujours être représentés par un seul circuit qui en sera la résultante, et qu'en dernier résultat le barreau aimanté pourra être considéré comme un simple assemblage de courans circulaires, marchant tous dans le même sens et contenus dans des plans parallèles entre eux et perpendiculaires à l'axe du barreau, ayant de plus leurs centres sur cet axe lui-même quand l'aimantation est régulière.

Ce que nous venons de dire d'un barreau cylindrique

peut s'appliquer à une aiguille ou en général à un aimant de forme quelconque: il suffira toujours de considérer l'axe magnétique et, autour de cet axe, des courans circulaires de grandeur finie perpendiculaires à sa direction et marchant dans le même sens.

D'après cela, il est facile d'imiter les aimans, sinon avec exactitude, du moins avec une approximation plus ou moins grande : car il suffit de prendre un fil de métal couvert de soie et d'y faire passer un courant après l'avoir roulé, comme le représente la fig. 395, en cercles séparés par des portions droites. Ces systèmes de courans s'appellent *cylindres électro-dynamiques*, ou *solénoïdes* : il y a toutefois quelque différence entre les solénoïdes et les aimans, parce que les cercles des solénoïdes ne sont pas tout-à-fait fermés, parce qu'ils communiquent entre eux, et parce que c'est le même courant qui les traverse. Mais ces différences ne peuvent point empêcher l'analogie générale des effets : d'ailleurs, il suffit de replier le fil comme on le voit dans la figure 395 pour neutraliser l'effet de la portion droite du fil qui unit les différens cercles, puisque alors dans cette ligne il y aura des courans égaux et contraires.

Un fil roulé en hélice (*fig.* 396) ne diffère en rien du solénoïde précédent, et le fil droit replié dans l'axe neutralise pareillement l'effet de l'obliquité de chaque tour de spire.

Pour représenter tous les phénomènes d'une aiguille ou d'un aimant donné, il ne faudrait pas sans doute rouler toujours le fil sur un cylindre, mais le plus souvent il faudrait le rouler ou sur des cônes opposés (*fig.* 397) ou sur des moules d'une autre forme qui ne serait même pas une surface de révolution.

Dans l'hypothèse dont il s'agit, le globe de la terre doit être aussi considéré comme sillonné par des courans intérieurs parallèles à l'équateur magnétique, mais dans chaque lieu on pourra toujours concevoir que l'ensemble des actions de tous ces courans se réduise à l'action d'un seul courant

hypothétique auquel on devra par conséquent attribuer une intensité et une position convenables pour représenter l'ensemble des effets. Nous appellerons ce courant, le *courant moyen de la terre* : sur l'équateur magnétique, le courant moyen est dans un plan vertical, mais, dans tous les autres lieux, il est plus ou moins incliné. Nous allons voir d'abord comment on peut déterminer sa direction et sa position.

252. *Direction du courant terrestre.* Il est facile de démontrer que *le courant moyen de la terre est dirigé de l'est à l'ouest* : en effet, la partie la plus efficace de ce courant étant sensiblement horizontale dans chaque lieu, il suffit de soumettre à son action un courant vertical, mobile autour d'un axe pareillement vertical, et d'observer ses positions d'équilibre. Or, nous avons constaté précédemment (241) que, sous l'action de la terre, un tel courant mobile se dirige toujours perpendiculairement au plan du méridien magnétique, et qu'il s'arrête à l'*est* quand il est *descendant*, et à l'*ouest* quand il est *ascendant*. Donc le courant terrestre est lui-même perpendiculaire au plan du méridien magnétique, et marche de l'est à l'ouest. Cependant cette expérience, qui donne aisément la direction du courant terrestre, ne décide rien sur sa position ; il peut passer au lieu même de l'observation, ou au nord ou au midi, comme on le voit dans la fig. 398 : s'il était par exemple au midi, en *cd*, il produirait le même résultat; car, *g* étant la projection de l'axe de rotation et *hik* la circonférence que peut décrire le courant mobile que nous supposerons ascendant, il est clair que ce courant mobile étant en *h*, il serait repoussé par le courant terrestre *dr* qui s'approche du point de croisement tandis que lui s'en éloigne, et qu'il serait au contraire attiré par *cr* qui s'éloigne comme lui du point de croisement; en vertu de cette double force il marcherait donc vers le point *i*, qui serait sa seule position d'équilibre. On ferait le même raisonnement sur le courant *ef*, qui est au nord du lieu de l'observation.

253. *Position du courant terrestre. Dans chaque lieu le courant terrestre est dans un plan perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison.* Pour le démontrer, il suffit de remarquer que, quand un courant rectangulaire *abcdef* (*fig.* 399) est bien équilibré autour de son axe de rotation, et qu'il n'est sollicité que par un seul courant *gh* parallèle à cet axe, il faut, pour la stabilité de l'équilibre : 1° que son plan coïncide avec le plan déterminé par l'axe et par le courant, 2° qu'il marche parallèlement au courant dans son côté qui en est le plus près. Cette conséquence, qui est indépendante de la direction de l'axe de rotation, s'applique évidemment au cas où cet axe serait horizontal ainsi que le courant qui sollicite le rectangle. Par conséquent, si l'on dirige l'appareil de la figure 400 de manière que l'axe de rotation soit parallèle au courant terrestre, c'est-à-dire, d'après ce que nous venons de voir, perpendiculaire au méridien magnétique, il est clair que le plan dans lequel le courant rectangulaire se mettra en équilibre sera rigoureusement le plan dans lequel se trouve le courant terrestre. Or, en faisant l'expérience, on trouve que le plan d'équilibre est perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison.

Ce résultat, qu'il est difficile de rendre parfaitement rigoureux à cause des frottemens, se trouve au reste confirmé par l'ensemble des observations.

Un courant circulaire ou d'une autre forme présenterait les mêmes effets.

Après avoir constaté la direction et la position du courant moyen de la terre, nous allons appliquer la théorie à l'explication des différens phénomènes.

Action de la terre sur les courans.

254. *Direction des courans fermés.* — Les côtés horizontaux du rectangle de la figure 401, étant traversés par des courans contraires, ne peuvent rien éprouver de la part du courant terrestre dont ils sont également éloignés ; l'appareil se

réduit donc aux deux côtés verticaux qui doivent se porter l'un à l'est et l'autre à l'ouest, comme nous venons de le voir. Aussi, le rectangle doit se placer perpendiculairement au méridien magnétique, et avoir son équilibre stable quand le côté descendant est à l'est, et le côté ascendant à l'ouest ; c'est en effet ce que nous avons observé (240).

La même explication s'applique au cercle de la figure 402, dont chaque quadran peut, à l'égard de l'action terrestre, être représenté par ses projections horizontales et verticales, en sorte qu'il se transforme en un rectangle.

Il en serait de même de tout autre circuit fermé, contenu dans un plan vertical et mobile autour d'un axe vertical.

255. *Rotation des courans horizontaux.* Le courant horizontal *ab*, mobile autour du point *a*, étant sollicité par le courant terrestre qui est lui-même horizontal, placé au dessous de lui et vers le sud, comme le représente la figure 403, doit tourner dans le sens *bcdf* quand le courant marche de la circonférence au centre, et dans le sens *bfdc* quand le courant va au contraire du centre à la circonférence. En effet, dans la position *ab*, les courans de l'appareil et de la terre étant parallèles et marchant dans le même sens, il y a une attraction qui tend à amener le point *b* en *c* : dans cette position, *ro* repousse *ca* et *rh* l'attire, il doit donc continuer sa route jusqu'en *d* ; là il y a répulsion entre les courans parallèles et opposés, et en *f* il y a attraction de *ro*, répulsion de *rh* : ainsi, le courant *ab* doit prendre son mouvement continu, comme nous l'avons en effet observé.

Action de la terre sur les aimans.

256. *Déclinaison.* Puisqu'un courant circulaire fermé se dirige perpendiculairement au méridien magnétique, il en résulte qu'un assemblage d'un nombre quelconque de cercles parallèles entre eux, et traversés par des courans marchant dans le même sens, doit se placer dans la même direction : or

un tel assemblage n'est autre chose qu'un solénoïde; donc un solénoïde horizontal doit se tourner de manière que son axe soit dans la direction de l'aiguille de déclinaison, le courant ascendant étant à l'ouest: c'est ce que l'on vérifie en effet au moyen du solénoïde de la figure 404, qui s'adapte à l'appareil de la figure 368.

Il en résulte que non seulement l'aiguille de déclinaison peut être assimilée à un solénoïde, mais que le pôle austral des aimans, c'est-à-dire celui qui se dirige vers le nord, est celui pour lequel le coté ascendant se trouve *à droite* quand on le regarde en face *par le bout*; ou, ce qui revient au même, quand une aiguille de déclinaison est en équilibre, les courans de sa surface *inférieure* vont de l'*est* à l'*ouest*, comme le courant terrestre.

257. *Inclinaison.* Puisqu'un courant fermé, mobile autour d'un axe perpendiculaire au méridien magnétique, se dirige dans un plan perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison, il est évident qu'un solénoïde bien équilibré dont l'axe de figure serait mobile dans le méridien magnétique se mettrait en équilibre en prenant rigoureusement la direction de l'aiguille d'inclinaison. Il serait difficile sans doute de faire des solénoïdes assez mobiles pour vérifier ce résultat par une expérience directe, mais il suffit de l'approximation que l'on peut obtenir au moyen de l'appareil (*fig.* 400) pour montrer que, même dans l'inclinaison, l'aiguille aimantée se comporte comme un véritable solénoïde.

258. *Variations diurnes et perturbations.* Dans la théorie ordinaire du magnétisme, on ne peut expliquer ces phénomènes qu'en admettant des modifications particulières dans l'état du magnétisme terrestre, et l'on comprend qu'il n'y a pas plus de difficulté d'attribuer ces modifications à un changement dans le courant électrique qu'à un changement dans la distribution magnétique.

Action mutuelle des aimans et des courans.

259. *Direction des aimans par les courans.* Nous avons résumé les divers effets de l'action primitive observée par M. OErsted, en disant que *le courant tend à tourner l'aiguille en croix avec lui, le pôle austral à gauche* (224). Essayons de voir comment ce fait général peut maintenant s'expliquer, en regardant l'aimant comme un solénoïde. Or, si nous concevons un courant vertical fixe et ascendant *ab* (*fig.* 405) et un courant rectangulaire mobile autour de l'axe horizontal *cd*, il est évident que le plan du rectangle deviendra vertical, le côté *ef* tendant à monter et le côté *gh* à descendre; car, dans le côté *ef*, le courant s'éloignant du point de croisement par rapport au courant *ab*, il est attiré par la partie supérieure de ce courant et repoussé par la partie inférieure: c'est le contraire pour *gh*, le plan du rectangle deviendra donc vertical; une fois dans cette position, il tend à se tourner de manière à passer par la direction du courant vertical *ab*, car le côté vertical le plus voisin est attiré et l'autre repoussé. Ainsi, lorsqu'un courant rectangulaire parfaitement mobile est sollicité par un courant vertical fixe, il tend à se tourner dans un plan vertical passant par la direction du courant fixe, et à s'y arranger de manière que son côté le plus près marche dans le même sens que ce courant.

Si nous considérons maintenant trois courans rectangulaires équidistans (*fig.* 406), il est évident que c'est celui du milieu qui sera dans le plan vertical du courant fixe, les deux autres étant appelés par des forces dont la résultante sera dans ce plan. Si, au lieu d'en concevoir seulement trois, nous considérons un solénoïde composé d'une infinité de rectangles, il en résultera, par la même raison, que l'axe du solénoïde sera exactement *en croix avec le courant.*

Ce résultat s'applique à un cercle aussi bien qu'à un rectangle; donc un solénoïde quelconque sollicité par un courant se tourne en croix avec lui.

Nous pouvons ajouter de plus que le pôle austral est à gauche, car, la gauche du courant étant derrière le plan de la figure 407, si l'on regarde en face le bout du solénoïde qui est derrière ce plan, on voit en effet qu'on a le courant ascendant à droite, ce qui est le caractère du pôle austral (256). Ainsi, en dernier résultat, la condition d'équilibre, entre un solénoïde et un courant rectiligne, est que la section moyenne du solénoïde et le courant soient dans un même plan, et que le pôle austral du solénoïde soit à gauche du courant.

Cette direction du solénoïde libre ou de l'aiguille aimantée libre étant une fois démontrée, on comprend combien il est facile d'expliquer, soit les conditions d'équilibre des aimans qui ne peuvent se mouvoir qu'autour d'un axe donné ou sur des plans donnés comme les aimans flottans, soit les conditions d'équilibre des courans assujettis d'une manière quelconque et sollicités par des aimans.

260. *Rotation des aimans par les courans.* Lorsque l'aimant tourne sur lui-même comme dans la figure 408, Ampère explique la rotation de la manière suivante : *abcd* étant la section de l'appareil par la surface du mercure, et *af* étant l'un des courans qui glissent sur la surface du mercure pour gagner l'anneau de cuivre par lequel il doit sortir du vase, la portion *ab* est attirée par *af*, tandis que *ad* est repoussé ; par conséquent l'aimant doit tourner en sens contraire du courant qui le constitue. Quand le courant passe au contraire du mercure à l'aimant, celui-ci tourne dans le sens de son courant.

Lorsque l'aimant décrit un cercle autour du conducteur qui plonge dans le mercure (*fig.* 409), l'explication est un peu plus compliquée, nous la donnerons telle qu'elle se trouve dans l'ouvrage d'Ampère.

« Représentons la section horizontale du solénoïde par le petit cercle *etft'* (*fig.* 409), dont le centre est *a*, et dont la circonférence *etft'* est un des courans électriques dont il est composé. En supposant que ce courant se meuve dans le

sens *etft'*, il sera attiré par les courans du mercure, tels que *puz*, qui se trouvent, dans la figure, à droite de *etft'*, parce que la demi-circonférence *etf*, où le courant va dans le même sens, en est plus rapprochée que *ft'e*, où il va en sens contraire. Soit *as* cette attraction égale à la différence des forces exercées par les courans *puz* sur les deux demi-circonférences, et qui passe nécessairement par leur centre *a*, puisqu'elle résulte des forces que ces courans exercent sur tous les élémens de la circonférence *etft'* qui leur sont perpendiculaires, et sont par conséquent dirigées suivant les rayons de cette circonférence. Le même courant *etft'* du solénoïde est au contraire repoussé par les courans qui, comme *p'u'z'*, sont, dans la figure, à gauche de ce courant *etft'*, parce qu'ils sont en sens contraire dans la demi-circonférence *ft'e*, la plus voisine de *p'u'z'*. Soit *as'* la répulsion qui résulte de la différence des actions exercées par les courans *p'u'z'* sur les deux demi-circonférences *ft'e*, *etf*, elle sera égale à *as* et fera, avec le rayon *cad*, l'angle *das'*=*cas*, puisque tout est égal des deux côtés de ce rayon : la résultante *ar* de ces deux forces lui sera donc perpendiculaire ; et, comme elle passera par le centre *a*, ainsi que ses deux composantes *as*, *as'*, le solénoïde n'aura aucune tendance à tourner autour de son axe, comme on l'observe en effet à l'égard de l'aimant flottant que représente ce solénoïde: mais il tendra, à chaque instant, à se mouvoir suivant la perpendiculaire *ar* au rayon *cad* ; et comme, lorsqu'on fait cette expérience avec un aimant flottant, la résistance du mercure détruit à chaque instant la vitesse acquise, on voit cet aimant décrire la courbe perpendiculaire à toutes les droites qui passent comme *cad* par le point *c*, c'est-à-dire la circonférence dont *ac* est le rayon. »

261. *Rotation des courans par les aimans*. L'explication de ce phénomène repose sur un principe général, qui ne peut pas être démontré directement par l'expérience, mais qui peut seulement, au moyen du calcul, se déduire des propriétés attractives et répulsives qui existent entre les courans et que

nous avons précédemment démontrées. Ce principe général peut être énoncé de la manière suivante : la résultante de toutes les actions qu'un solénoïde indéfini exerce sur un courant rectiligne de petite étendue, est une force perpendiculaire au triangle qui a pour base le courant et pour sommet l'extrémité de l'axe du solénoïde. Cette force est appliquée au milieu de la longueur du courant, et elle est indépendante de la direction de l'axe du solénoïde, qui peut être quelconque, pourvu que son extrémité reste toujours au même point.

Ainsi, *ab* (*fig.* 410) étant un petit courant rectiligne, et *s* l'extrémité de l'axe d'un solénoïde indéfini, c'est-à-dire dont l'autre extrémité *s'* puisse être regardée comme infiniment éloignée, la résultante *mv* de l'action du solénoïde sur le courant *ab* est perpendiculaire au plan *sab*, et appliquée au point *m*, milieu de *ab* ; elle est du reste tout-à-fait indépendante de la courbure et de la direction de l'axe *ss'*, qui peut prendre toutes les positions possibles autour du point *s*, sans que la résultante éprouve de changement ni dans sa grandeur ni dans sa direction (1).

Dans l'impossibilité de démontrer ce principe, nous essaierons cependant de l'appliquer à quelques cas particuliers pour en faire sentir la justesse.

1° Si la direction prolongée de l'élément vient passer à l'extrémité *s* de l'axe du solénoïde, l'action se réduit à zéro, d'après le principe, et c'est ce qu'il est facile de démontrer directement.

ab étant le courant élémentaire (*fig.* 411) et *s* le sommet du

(1) L'énoncé précédent suffit pour l'objet que nous nous proposons. Cependant, pour ceux qui voudront comprendre le principe dans son ensemble, nous ajouterons que la résultante dont il s'agit est en raison directe :

1° de l'intensité du courant du solénoïde,

2° de l'intensité du courant de l'élément *ab*,

3° de la longueur *ab* de l'élément,

4° du sinus de l'angle *ams*,

et qu'en même temps elle est en raison inverse du carré de la distance *ms*.

solénoïde, concevons un petit courant circulaire ayant son centre au point s, et dont le plan soit perpendiculaire à sab; menons un diamètre quelconque cd, et considérons les effets de deux élémens x et y diamétralement opposés : entre l'élément x et ab il y a attraction, parce qu'ils s'approchent tous deux du point de croisement; mais, entre l'élément y et ab il y a une attraction égale et contraire qui détruit la première; et, comme il en est de même de tous les élémens diamétralement opposés, il en résulte évidemment que l'action du cercle sur l'élément est tout-à-fait nulle. Il en serait de même de tous les cercles du solénoïde indéfini dont l'axe serait sur le prolongement de ab.

Il en serait de même encore si le premier cercle du solénoïde était dans un plan passant par l'élément ab, et si l'axe du solénoïde était perpendiculaire à ce plan (*fig.* 412); car, les cercles du solénoïde étant infiniment petits par rapport à la distance sa, les actions opposées comme celles qui résultent de deux élémens consécutifs en c et de deux élémens consécutifs en d se détruisent toujours.

2° Si la direction de l'élément ab ne passe plus par l'extrémité de l'axe du solénoïde, si elle est par exemple perpendiculaire à cet axe et à une certaine distance sa (*fig.* 413), il y a alors une résultante perpendiculaire au triangle sab : en effet les élémens e et f, parallèles au courant ab, produiront des effets égaux et contraires; mais les deux élémens symétriques x et y de la partie supérieure donneront naissance à une résultante verticale mv, et les deux élémens x' et y' pareillement symétriques de la partie inférieure donneront naissance à une résultante verticale dirigée dans le même sens que la première; ainsi, la résultante du cercle entier sera verticale et par conséquent perpendiculaire au triangle sab.

Ces exemples particuliers suffisent pour donner une idée des bases sur lesquelles repose le principe général. Nous allons voir maintenant comment ce principe explique la rotation des courans verticaux ou horizontaux produits par les aimans.

Courans verticaux. ab (*fig.* 414) étant un courant vertical mobile autour de l'axe *zx*, et *s* étant l'extrémité de l'axe *s's* d'un solénoïde, la résultante de l'action du solénoïde est perpendiculaire au triangle *sab*, dans toutes les positions que le courant peut prendre autour de son axe de rotation; par conséquent le courant doit tourner d'un mouvement continu. La direction de ce mouvement change avec le sens du courant *ab*, et aussi avec le pôle du solénoïde ou de l'aimant, comme nous l'avons observé (244).

Courans horizontaux. Le même raisonnement s'applique au courant horizontal *ab* (*fig.* 415).

Action des aimans les uns sur les autres.

262. *Attraction et répulsion des aimans.* Concevons un solénoïde qui s'étende indéfiniment de part et d'autre du point *m* (*fig.* 416), et dont le courant marche dans le sens indiqué par les flèches ; concevons ensuite que ce solénoïde soit coupé en *m* et que les deux parties soient écartées l'une de l'autre comme le représente la figure 417. Il résulte de notre définition (256): 1° que l'extrémité *a* est un pôle austral, car, en regardant en face le cercle qui la termine, on voit que le courant *ascendant* se trouve à droite ; 2° que l'extrémité *b* est un pôle boréal, car, en regardant en face le cercle qui la termine, on voit que le courant *ascendant* se trouve à *gauche* ; ainsi, en coupant un solénoïde perpendiculairement à son axe, les deux pôles qui en résultent sont toujours deux pôles de noms contraires, comme quand on brise un aimant.

De plus, il est évident que les pôles contraires *a* et *b* des deux solénoïdes s'attirent l'un l'autre, car, en considérant seulement les cercles qui les terminent, on voit que les courans y sont parallèles et dirigés dans le même sens, et il en est de même de tous les autres. On démontre d'ailleurs par le calcul que cette attraction est en raison inverse du carré de la distance qui sépare les deux pôles *a* et *b*; ce qui est, entre

les solénoïdes et les aimans, une nouvelle analogie bien fondamentale.

Comme on démontre d'ailleurs (ce que nous avons déjà indiqué (261) que l'action d'un solénoïde indéfini est tout-à-fait indépendante de la position que son axe peut prendre autour de son extrémité, il en résulte que les deux solénoïdes de la figure 417 peuvent prendre toutes les positions possibles, l'un autour du point *a*, et l'autre autour du point *b*, sans cesser pour cela de s'attirer avec la même intensité.

Ainsi, quand on coupe un solénoïde indéfini, on donne naissance à deux pôles qui sont en tout comparables aux deux pôles que l'on obtiendrait en brisant un barreau aimanté d'une très grande longueur.

Lorsqu'un solénoïde a une longueur déterminée, comme *ab* (*fig.* 418), ses deux pôles *a* et *b* sont évidemment, l'un un pôle austral et l'autre un pôle boréal, puisqu'en regardant le bout *a* le courant ascendant est à droite, tandis qu'en regardant le bout *b* il est à gauche. Or, en brisant le solénoïde défini, on obtiendrait des résultats analogues à ceux que donnent les solénoïdes indéfinis, du moins quant au sens de l'action, mais non pas quant à l'intensité; car ici, les seconds pôles de chacun des solénoïdes que l'on obtient n'étant plus infiniment éloignés, on doit tenir compte de leur action.

Par conséquent deux solénoïdes définis, tels que *ab* et *a'b'* (*fig.* 419), qui agissent l'un sur l'autre, donnent naissance, comme deux aimans, à un système de quatre forces, deux attractives et deux répulsives; les forces attractives s'exercent suivant *ab'* et *ba'*, et les forces répulsives suivant *aa'* et *bb'*.

263. *Aimantation.* Dans la théorie dont nous nous occupons, les corps magnétiques, comme le fer doux ou l'acier non aimanté, sont considérés comme ayant déjà des courans autour des molécules qui les constituent; seulement, on est obligé de faire à leur égard plusieurs hypothèses distinctes:

1re *Hypothèse.* On admet que les courans étant dirigés

indistinctement et confusément dans tous les sens possibles, l'ensemble des actions qu'ils exercent au dehors est toujours réduit à zéro, parce que ceux qui agissent dans un sens détruisent toujours l'effet de ceux qui agissent en sens contraire.

2e *Hypothèse.* On admet qu'au moment où une cause extérieure quelconque vient à faire sentir son action sur les courans, ils se rangent en tout ou en partie dans un certain ordre pour obéir à l'action qui les sollicite.

3e *Hypothèse.* Si le corps est sans force coercitive, comme le fer doux, l'on admet que la cause extérieure cessant d'agir, les courans, par leur action mutuelle, retombent dans l'état de confusion où ils étaient d'abord : mais, si le corps est doué de force coercitive, comme l'acier, on admet au contraire que les courans, une fois rangés dans l'ordre convenable pour former des solénoïdes, conservent cet ordre malgré les actions intérieures qui peuvent s'exercer pour le troubler.

On voit, d'après cela, que l'aimantation n'est qu'un arrangement des courans qui préexistent dans les corps magnétiques : si on les tourne dans un sens, les pôles se montrent dans un certain ordre ; et, si on les tourne en sens contraire, les pôles se montrent en sens inverse.

Il reste assurément de belles recherches à faire sur ces courans moléculaires, soit pour démontrer leur existence d'une manière plus directe, soit pour arriver jusqu'à la cause qui les produit, soit enfin pour déterminer les principales circonstances des modifications qu'ils reçoivent de la part de la chaleur ou des autres agens physiques : mais, en attendant, il nous a semblé nécessaire d'exposer avec quelques développemens une théorie qui établit des rapports si remarquables entre les phénomènes du magnétisme et ceux de l'électricité

CHAPITRE IV.

Causes diverses qui donnent naissance à des courans électriques.

264. Puisque les courans électriques ne sont autre chose que la recomposition des deux fluides contraires, il en résulte que toutes les causes qui sont capables de développer de l'électricité sont capables aussi de produire des courans; car les deux fluides sont toujours développés simultanément; et, comme chaque fluide libre tend à se réunir à une égale quantité de fluide contraire, il suffit de permettre cette réunion pour que le courant soit produit. On pourrait penser que le résultat inverse doit toujours avoir lieu, c'est-à-dire qu'il suffit d'interrompre un courant quelconque pour avoir les deux électricités opposées à l'état de repos et de tension; mais il n'est pas toujours possible de le démontrer par l'expérience, soit que nos moyens d'observation soient trop peu délicats, soit que, dans certains cas, la circulation de l'électricité doive être réellement une condition essentielle de son développement. Sans rien décider à cet égard, nous nous bornerons à remarquer que ous les courans jusqu'à présent connus doivent leur origine à quatre causes différentes, savoir: à des actions mécaniques, à des actions physiques, à des actions chimiques, à des actions physiologiques; et nous examinerons successivement les principales circonstances de leur formation, et les procédés particuliers au moyen desquels on peut les rendre sensibles.

Actions mécaniques.

265. Le *frottement*, la *pression* et le *clivage* sont trois genres d'actions mécaniques que l'on peut distinguer l'un de l'autre par rapport à l'électricité qu'ils développent, bien

que l'on ne sache pas s'ils impriment aux atomes ou à leurs groupes moléculaires des modifications réellement différentes.

Le *frottement* peut être varié de mille manières; mais, dans les machines ordinaires, on a essayé de réunir les conditions les plus propres à donner le maximum d'effet. Lorsqu'au lieu d'accumuler l'électricité sur les conducteurs on veut la transformer en courant, il suffit de disposer un fil de communication entre les conducteurs et les coussins, ou seulement entre les conducteurs et le sol; ce fil est alors traversé par un courant comme s'il réunissait les deux pôles d'une pile plus ou moins forte, et il est en effet capable d'agir sur l'aiguille aimantée. Cependant, son action est peu énergique : une grande machine, produisant de rapides et brillantes étincelles à une distance considérable, donne un si faible courant qu'il faut, pour en constater la présence, un multiplicateur assez sensible : une machine de Nairne assez puissante ne donne, par exemple, que 30 ou 40 degrés de déviation aux aiguilles compensées d'un multiplicateur de 500 tours (*Colladon, Annales de Physique et de Chimie*, tome 23, page 62). Dans ces expériences, il importe surtout que les différens tours du multiplicateur soient bien isolés l'un de l'autre : pour cela, il faut donner au fil une double ou triple couverture de soie, et l'envelopper encore de taffetas gommé, ou le passer dans un bain de résine fondue et mélangée de gomme laque.

Lorsque les extrémités du multiplicateur ne sont pas en contact avec les conducteurs, mais seulement présentées à distance, le courant est plus faible et son intensité paraît être en raison inverse de la distance, du moins pour les distances comprises entre 1 décimètre et 1 mètre.

Si les courans produits par les machines sont si faibles lorsqu'on les compare à ceux que donnent les piles voltaïques, cela tient sans doute à la prodigieuse vitesse avec laquelle les fluides électriques se transmettent et à la lenteur avec laquelle

le frottement les développe. Cependant il n'est pas démontré, jusqu'à présent, que l'électricité n'ait qu'un mode unique de transmission au travers des conducteurs, et l'on ne pourra décider cette question que par la mesure exacte des quantités de fluides qui passent et des effets qu'ils produisent.

On a fait de nombreux essais pour découvrir comment il arrive que le frottement dégage de l'électricité, mais, sur ce point, l'on n'est parvenu à aucune notion précise. On dit bien que la séparation des fluides est due à l'ébranlement ou au déplacement des molécules ; mais cette explication n'explique rien : car, dans les changemens d'état des corps, à coup sûr il y a ébranlement et déplacement des molécules, et cependant aucune électricité n'est produite ; il reste donc d'autres conditions essentielles qui sont inconnues.

Quelques physiciens supposent, il est vrai, que le frottement qui donne de l'électricité est toujours accompagné d'une action chimique, et qu'il suffit d'empêcher cette action pour que l'électricité cesse de se produire. Cette opinion repose principalement sur l'expérience suivante du docteur Wollaston (*Annales de Phys. et de Chim.* t. 16 p. 53). Une machine électrique ayant été enfermée dans un vase où l'on pouvait changer l'air, on voyait le développement d'électricité cesser ou reprendre son énergie, suivant que le vase était rempli d'acide carbonique ou d'air atmosphérique; mais cette expérience ne suffit pas pour démontrer, d'une manière rigoureuse, que toute l'électricité résultant du frottement est due en réalité à l'action chimique que le frottement détermine, et non à l'action mécanique qu'il exerce. Pour résoudre nettement cette question, il faudrait constater la nature et la quantité de l'action chimique produite par le frottement, et la comparer à la quantité des fluides décomposés.

S'il nous est impossible d'assigner la véritable origine de l'électricité qui se manifeste par le frottement, nous essaierons du moins d'indiquer les principales circonstances qui

paraissent agir d'une manière constante pour en modifier le développement. Les nombreuses expériences qui ont été faites sur ce sujet peuvent être résumées par les propositions suivantes :

1° Deux corps solides quelconques, bons conducteurs ou mauvais conducteurs, prennent toujours, par le frottement, l'un l'électricité résineuse et l'autre l'électricité vitrée, lorsqu'on prend toutefois les précautions convenables pour les sécher, pour les isoler, etc., etc.

Le frottement qui s'exerce entre les solides et les liquides paraît suffisant pour développer aussi de l'électricité dans un grand nombre de cas. Le mercure est probablement, sous ce rapport, le plus énergique des liquides.

Le frottement des liquides entre eux pourrait sans doute, dans les circonstances convenables, développer aussi de l'électricité.

Le frottement des gaz, soit entre eux, soit avec les liquides ou les solides, ne paraît, dans aucun cas, développer de l'électricité, du moins quand les gaz ne sont point chargés de parcelles solides ou liquides.

2° Lorsqu'on élève la température d'un corps, on lui donne une tendance à prendre l'électricité résineuse; et, comme cette tendance n'est pas la même pour des accroissemens égaux de la température, il en résulte qu'en frottant deux corps à des températures différentes, celui qui est vitré à une température plus basse peut devenir résineux à une température plus élevée; il en résulte aussi que deux morceaux d'une même substance, quoique parfaitement pareils, et prenant une égale part au frottement, peuvent donner de l'électricité s'ils sont à des températures différentes, le plus chaud prenant toujours alors l'électricité résineuse.

3° L'état de la surface d'un corps n'est pas sans influence sur l'espèce de fluide qu'il prend par le frottement : on remarque, en général, que les petites aspérités de la surface donnent aux corps, et surtout aux corps mauvais conduc-

teurs, une tendance à prendre l'électricité résineuse. Ainsi, en frottant l'une sur l'autre deux lames du même verre, l'une polie et l'autre dépolie, la première prend l'électricité vitrée et la seconde l'électricité résineuse : cependant, il y a d'autres causes qui produisent le même effet, comme nous l'avons indiqué pour le disthène (192).

4° Une lame de métal prend toujours l'électricité vitrée, lorsqu'elle est frottée par de la poudre plus ou moins fine du même métal (*Becquerel*, t. 2, p. 117) : on en fait l'expérience, en mettant en contact avec l'un des plateaux du condensateur une petite coupe dans laquelle on reçoit la fine limaille métallique qui a été projetée avec plus ou moins de vitesse sur une lame de même métal que l'on tient à la main ; l'électricité dont se charge le condensateur montre que la limaille a pris l'électricité résineuse par son frottement rapide sur la lame.

5° Deux lames de différens métaux, frottées l'une contre l'autre, prennent assez d'électricité pour donner naissance à un courant sensible : on en fait l'expérience en adaptant les lames aux deux extrémités du fil d'un multiplicateur, et en les faisant ensuite glisser l'une contre l'autre ; le sens de la déviation de l'aiguille indique l'espèce du fluide qui se développe sur chaque lame, et l'on a pu former ainsi la table suivante, dans laquelle chaque métal est vitré avec ceux qui le suivent, et résineux avec ceux qui le précèdent (*Becquerel*, t. 2, p. 114) :

Antimoine.	Argent.	Platine.
Arsenic.	Or.	Palladium.
Admium.	Cuivre.	Cobalt.
Fer.	Etain.	Nickel.
Zinc.	Plomb.	Bismuth.

6° La tension de l'électricité développée par le frottement est indépendante de la vitesse, de la pression, de l'étendue des surfaces en contact, de l'épaisseur des corps frottans et du mode de frottement (*Péclet*, *Ann. de phys. et de chim.*, t. 57, p. 337).

266. La simple pression, sans frottement latéral, exerce sur les molécules des corps une action mécanique qui n'est sans doute pas la même que celle du frottement, bien qu'il soit difficile d'assigner avec précision en quoi consiste la différence ; cependant, la pression est capable aussi de développer de l'électricité, comme nous l'avons vu (216).

M. Becquerel a construit un grand appareil pour étudier ces phénomènes, et il paraît résulter, de ses nombreuses recherches, que la quantité des fluides dégagés est proportionnelle à la pression. Les liquides n'ont pas été soumis à ces épreuves, et les gaz, qui sont si éminemment compressibles, n'ont manifesté aucune apparence électrique. Il nous semble, au reste, qu'en limitant même ce sujet aux corps solides, il offre peut-être beaucoup moins d'importance que de difficultés : il est probable que l'on produirait un courant avec cette électricité, en prenant très minces les disques qui doivent se presser, et en les collant sur des lames de métal qui seraient elles-mêmes adaptées aux deux extrémités du fil d'un multiplicateur convenable.

Le clivage s'opère avec plus ou moins de facilité dans la plupart des corps lamellaires régulièrement cristallisés, comme le talc, le mica, la chaux sulfatée, la baryte sulfatée, le feldspath, la topase, etc. Si l'on fixe des manches isolans aux deux grandes faces d'une lame mince de l'un de ces corps, et que, par un effort particulier, on la divise en deux dans le sens du clivage, les deux lamelles qui en résultent sont électrisées, l'une vitreusement, l'autre résineusement (*Becquerel*, *t.* 2, *p* 112).

Ces électricités sont sans doute trop faibles pour que l'on puisse les transformer en un courant sensible.

Actions physiques.

267. Les actions physiques qui développent de l'électricité sont : les actions capillaires, et les actions de la chaleur, du

magnétisme et de l'électricité ; car, jusqu'à présent, on n'a pas lieu de penser que l'action de la lumière puisse, dans aucune circonstance, déterminer la séparation des fluides électriques.

268. M. Becquerel attribue à l'action capillaire les phénomènes électriques qu'il a observés dans les circonstances suivantes :

A l'un des bouts du fil d'un multiplicateur très sensible on adapte une cuiller de platine remplie d'acide nitrique pur, à l'autre bout du même fil on adapte une éponge de platine soigneusement lavée à l'acide nitrique, et ensuite chauffée au rouge; on plonge ensuite cette éponge dans l'acide de la cuiller, et l'on observe une déviation dans l'aiguille du multiplicateur ; le sens du courant montre que l'éponge a pris l'électricité négative : cependant, après quelques instans, on observe un courant contraire.

Lorsque l'acide est étendu de la moitié de son poids d'eau, l'on n'observe que le premier effet; il n'y a plus de courant inverse.

L'acide chlorhydrique concentré donne des effets inverses de ceux de l'acide nitrique pur.

Ces faits sont peut-être trop restreints et trop complexes pour qu'il soit permis d'en conclure d'une manière générale que l'action capillaire dégage de l'électricité.

269. L'action de la chaleur ne se fait pas seulement sentir sur la tourmaline et sur d'autres cristaux pour les rendre électriques, comme nous l'avons vu (217), mais elle se fait sentir aussi sur les corps bons conducteurs, et particulièrement sur les métaux, pour y développer des courans plus ou moins énergiques qui ont été découverts en 1821 par le docteur Seebeck, de Berlin : ces courans, que l'on appelle *thermo-électriques*, à cause de leur origine, constituent aujourd'hui, sous le nom de *thermo-magnétisme*, l'une des branches les plus intéressantes de l'électro-magnétisme. Nous ne ferons connaître ici que les principales conditions

sous lesquelles ils se produisent; mais, dans l'un des chapitres suivans, nous essaierons d'établir les lois remarquables de leur intensité.

Les recherches qui ont été faites sur la formation de ces courans peuvent être résumées par quelques propositions générales que nous allons successivement examiner.

Première proposition. Deux fils métalliques étant soudés bout à bout, de manière à composer un circuit fermé de forme quelconque, il s'établit dans le circuit un courant plus ou moins énergique, toutes les fois que les deux soudures sont à des températures différentes, et le courant persiste aussi long-temps que la différence des températures est maintenue.

On démontre cette proposition pour un cas particulier au moyen de l'appareil qui est représenté dans la fig. 420: *s s'* est un cylindre de bismuth; *s c s'* une barre ou une lame de cuivre recourbée et soudée aux extrémités *s* et *s'* du cylindre de bismuth, *a b* une aiguille aimantée, libre sur son pivot. Les soudures *s'* et *s* étant à la température ambiante, on dirige le plan vertical de l'appareil dans le méridien magnétique; alors, si l'on échauffe la soudure *s* par exemple, l'aiguille éprouve une déviation plus ou moins considérable, et, si l'on refroidit la même soudure *s* au-dessous de la température ambiante, l'aiguille éprouve une déviation en sens contraire.

Ces mouvemens de l'aiguille, tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre, accusent bien évidemment la présence d'un courant électrique qui se propage dans un sens lorsque la soudure *s* est plus chaude que la soudure *s'*, et dans le sens opposé quand au contraire c'est la soudure *s'* qui est plus chaude que la soudure *s*. Cette conséquence se confirme encore en agissant sur la soudure *s'*, au lieu d'agir sur la soudure *s*.

Tous les métaux ne donnent pas des résultats aussi frappans que le bismuth et le cuivre; mais alors, au lieu d'une

seule aiguille, on emploie un système de deux aiguilles compensées comme on le voit dans la figure 421 : la bande supérieure *s c s'* est fendue pour laisser passer l'aiguille inférieure, et le pivot s'élève jusqu'à l'aiguille supérieure.

Pour faire voir que les différences de température les plus imperceptibles entre le bismuth et le cuivre sont capables de développer des courans très énergiques, on emploie l'appareil qui est représenté dans la figure 422.

Enfin, pour un très grand nombre d'expériences, il est nécessaire d'avoir recours à l'emploi du multiplicateur; mais les *multiplicateurs thermo-électriques* doivent, en général, être composés avec un fil très gros et n'avoir qu'un petit nombre de tours, comme nous l'expliquerons plus loin (chap. VI) : si, avec les deux extrémités du fil de cuivre d'un tel multiplicateur, on touche, par exemple, un morceau de bismuth ou d'antimoine, on verra que la moindre différence de température aux deux points de contact détermine une déviation considérable.

Pour étudier par ce moyen les courans thermo-électriques donnés par deux métaux quelconques, comme le fer et le platine, il suffit de couper en deux un fil de platine, et d'adapter chacune de ces moitiés à chacun des bouts du multiplicateur, de manière que le contact soit bien métallique ; alors, pourvu que ces jonctions soient exactement à la même température, le multiplicateur, armé de ses deux bouts de platine, jouira des mêmes propriétés que s'il était tout entier composé d'un fil de platine continu, c'est à dire qu'en touchant maintenant avec un fil de fer les deux extrémités du multiplicateur, on aura des courans qui ne pourront résulter que de la différence de température des deux points de contact du fer et du platine.

En soumettant les différens métaux à cette épreuve, ou à d'autres analogues, on arrive aisément à démontrer la proposition générale que nous avons énoncée; mais l'on reconnaît en même temps que les différentes couples métalliques

ont à cet égard des sensibilités très différentes, car, dans les mêmes circonstances, les unes donnent des courans d'une grande énergie, et les autres des courans excessivement faibles.

On a pareillement essayé, par les mêmes moyens, de classer les métaux à raison de leur tendance à prendre l'électricité positive ou négative, et les résultats que l'on a obtenus sont représentés dans le tableau suivant, où chaque métal est positif avec tous ceux qui le suivent, et négatif avec tous ceux qui le précèdent :

Antimoine.	Laiton.	Cobalt.
Arsenic.	Rhodium.	Palladium.
Fer.	Plomb.	Platine.
Zinc.	Etain.	Nickel.
Or.	Argent.	Mercure.
Cuivre.	Manganèse.	Bismuth.

M. Becquerel a observé qu'à de très hautes températures le fer et le platine changent de rôle : mais cette inversion ne paraît pas constante ; car je n'ai rien observé de pareil dans un très grand nombre d'expériences dont il sera question à l'article du *Pyromètre magnétique*, destiné à la mesure des plus hautes températures.

Deuxième proposition. Lorsqu'on chauffe ou qu'on refroidit quelques points d'un circuit métallique fermé et composé d'un seul métal homogène, on y détermine, sous certaines conditions, des courans plus ou moins énergiques.

Le bismuth et l'antimoine paraissent être les métaux les plus propres à montrer ce phénomène remarquable : ainsi, en prenant par exemple un morceau d'antimoine de forme quelconque, et en disposant sur une de ses faces une petite aiguille aimantée légèrement suspendue, on trouve toujours sur le contour de ce morceau plusieurs points tels qu'en les chauffant on imprime à l'aiguille aimantée une déviation très sensible dans un sens ou dans l'autre : cette observation est due aussi au docteur Seebeck.

Plusieurs physiciens ont étudié ce phénomène remarqua-

ble : MM. Yelin, Cumming et Sturgeon, se sont particulièrement appliqués à donner des formes régulières aux morceaux de bismuth et d'antimoine, ou à composer avec ces métaux des circuits rectangulaires, elliptiques, circulaires, etc., etc., pour déterminer les points les plus efficaces et les directions des courans qui résultent de l'échauffement ou du refroidissement de ces points. Mais, jusqu'à présent, il nous paraît impossible d'énoncer aucun fait général, soit sur la direction, soit sur l'intensité de ces courans singuliers; car des circuits semblables et de grandeurs différentes donnent presque toujours des résultats différens.

Quelques observateurs attribuent ces effets à des groupes cristallins qui se forment pendant le refroidissement des métaux, et qui empêchent l'uniforme propagation de la chaleur dans tous les sens. Cette opinion n'est pas sans fondement, mais il nous semble que des observations plus directes seraient nécessaires pour l'établir d'une manière rigoureuse.

M. Becquerel a donné plus d'extension à ce fait curieux; il a montré qu'il s'applique aussi à des fils de platine, et, en analysant avec sa sagacité ordinaire les principales circonstances qui modifient les résultats, il a établi le principe suivant : Lorsqu'un fil de platine forme un circuit fermé, et que sur un point de sa longueur se trouve un obstacle quelconque capable de ralentir la propagation de la chaleur, si l'on chauffe le fil à une petite distance de ce point, il se produit un courant qui dans cet intervalle est dirigé vers l'obstacle, et qui parcourt dans le même sens toute l'étendue du circuit.

Ainsi, en mettant les deux bouts d'un fil de platine en contact avec les deux extrémités d'un multiplicateur, et en maintenant ces jonctions très exactement à la même température pour empêcher les effets thermo-électriques ordinaires, on obtient des courans dirigés de *a* en *b*, lorsqu'on chauffe en *a* après avoir replié le fil en hélice en *b*, ou après y avoir fait un simple nœud, comme on le voit dans la fig. 423.

On obtient des effets analogues avec le cuivre lorsqu'il est un peu oxidé; ainsi, en accrochant en *b* les deux bouts d'un multiplicateur (*fig.* 424) et en chauffant en *a*, il se manifeste un courant de *a* en *b* lorsque les fils ne sont pas parfaitement décapés (*Becquerel*, *t.* 2, *page* 40).

Cependant Nobili a obtenu des courans inverses avec des métaux plus oxidables, comme le zinc, le fer et l'antimoine. (*Biblioth. univ. de Genève*, *t.* 27, *pag.* 118.)

Actions chimiques.

270. Les actions chimiques sont si prodigieusement diversifiées qu'il ne peut pas être ici question de les examiner en détail pour étudier les phénomènes électriques qui les accompagnent; cependant, nous indiquerons les faits les plus généraux, afin de justifier au moins par quelques exemples frappans ce principe fondamental qui ne paraît souffrir aucune exception, savoir, que jamais les élémens matériels ne peuvent s'unir ou se désunir chimiquement sans qu'il y ait dégagement d'électricité.

Nous nous bornerons donc à montrer comment l'on rend sensible l'électricité qui se dégage par la combustion, par l'action des acides sur les métaux ou sur les bases, par la réaction des dissolutions les unes sur les autres et par quelques décompositions chimiques.

Quelques physiciens avaient pensé depuis long-temps que la combustion doit donner de l'électricité, mais ce résultat important n'avait pas été constaté avant la publication de mon *Mémoire sur l'Origine de l'Électricité atmosphérique* (*Ann. de Phys. et de Chim.*, *t.* 35, *p.* 401); je donnerai seulement une idée sommaire des procédés et des faits contenus dans ce travail.

Dans la combustion du charbon, l'acide carbonique est électrisé positivement, et le charbon négativement. Pour recueillir l'électricité négative, on prend un charbon conduc-

teur taillé en cylindre à bases bien parallèles ; on enflamme une de ces bases, et par l'autre on le pose debout sur une longue plaque de laiton qui communique au condensateur (*fig.* 425); alors, en soufflant au moyen d'une vessie remplie d'air ou d'oxigène, on entretient la combustion sur la base supérieure seulement, et le plateau inférieur du condensateur étant mis en communication avec le sol, il suffit de très peu d'instans pour charger l'appareil.

Pour recueillir l'électricité positive, on dispose le charbon verticalement sur une plaque métallique communiquant au sol (*fig.* 426), on le maintient en combustion comme dans l'expérience précédente, et on le présente à quelque distance au-dessous de la plaque de laiton ; l'autre plateau du condensateur étant mis en communication avec le sol, l'appareil est promptement chargé par l'électricité vitrée que l'acide carbonique cède à la plaque à mesure qu'il s'élève contre sa surface.

Dans la combustion de l'hydrogène, l'oxigène s'électrise encore positivement et l'hydrogène négativement. Pour recueillir l'électricité négative, on adapte à la vessie qui contient l'hydrogène un tube de métal que l'on fait communiquer au condensateur, et à l'extrémité duquel on enflamme le gaz; on peut encore adapter au plateau du condensateur un long fil de platine, dont l'extrémité est roulée en spire étroite, et faire soigneusement plonger dans l'*intérieur* de la flamme la totalité de la spire (*fig.* 427).

Pour recueillir l'électricité positive de l'oxigène, il suffit de présenter la spire précédente à quelque distance de la flamme (*fig.* 428), ou de lui donner un diamètre plus grand que la flamme elle-même, de manière qu'elle puisse l'envelopper; alors elle prend de l'électricité positive, même à la distance de plusieurs millimètres. On comprend, d'après cela, combien les résultats doivent être variables et incertains lorsque la spire est en partie dans la flamme et en partie au dehors.

En faisant germer des plantes dans des capsules isolées et

au milieu d'une atmosphère suffisamment sèche, il m'a été possible de recueillir aussi les électricités qui se développent dans l'acte de la végétation.

Ces expériences, et d'autres analogues, conduisent à ce principe général : *Toutes les fois que l'oxigène se combine avec un autre corps, il y a dégagement d'électricité; l'oxigène donne toujours l'électricité positive, et le corps combustible l'électricité négative.*

On ne doit pas s'étonner, d'après cela, que, dans toutes les décompositions chimiques qui s'accomplissent au moyen de la pile, l'oxigène se rende au pôle positif et les corps combustibles au pôle négatif; car il faut sans doute que, pour se séparer et reprendre leur état libre, ces élémens reçoivent précisément la même quantité du même fluide qu'ils ont dégagé dans l'acte de leur combinaison.

Lorsque les acides agissent sur les métaux, il se produit en général deux phénomènes : le premier est l'oxidation du métal, qui est une combustion; et le second, qui succède ordinairement au premier, est la combinaison de l'oxide avec l'acide, qui est encore analogue à la combustion, en ce que l'acide joue toujours le même rôle que l'oxigène, tandis que l'oxide joue le même rôle que le corps combustible; on doit donc s'attendre à un dégagement d'électricité plus ou moins considérable pendant que ces phénomènes s'accomplissent.

Plusieurs physiciens, parmi lesquels on doit citer particulièrement MM. Avogrado, Becquerel, De la Rive et Nobili, sont en effet parvenus à des découvertes importantes sur ce sujet : mais, ces recherches tiennent de trop près à la chimie pour qu'il nous soit permis de les exposer en détail; nous devons nous borner aux conséquences les plus générales de leurs résultats.

Lorsqu'on plonge les deux extrémités du multiplicateur dans un acide qui attaque le cuivre, on voit à l'instant l'aiguille s'agiter et accuser la présence d'un courant très énergique; ce courant change de direction d'un instant à l'autre,

et le moyen le plus efficace pour lui imprimer une direction constante paraît être de tenir l'un des fils en repos dans l'acide, tandis que l'autre est vivement agité : cet effet résulte de l'inégale action chimique que l'acide exerce sur les deux fils.

Pour soumettre un autre métal à la même épreuve, il suffit d'en prendre deux morceaux attachés chacun à l'extrémité de l'un des fils du multiplicateur, et de prendre les précautions convenables pour qu'il n'y ait pas d'inégalité de température aux deux jonctions du métal avec le multiplicateur; alors, les deux morceaux étant plongés dans l'acide, on observe les courans qui résultent de l'ensemble des actions chimiques qui s'exercent entre le métal et l'acide.

Ainsi, deux fils d'or pur étant simplement tortillés autour des deux extrémités du multiplicateur, et plongés ensuite dans l'eau régale, on obtient un courant très sensible; ce courant peut encore être rendu plus énergique, en plongeant ces fils d'or dans de l'acide nitrique à une assez grande distance l'un de l'autre, et en versant quelques gouttes d'acide hydrochlorique autour de l'un des fils seulement : dans ce cas, en effet, l'action chimique est très inégale ; car, au premier instant, elle est vive sur l'un des fils et nulle sur l'autre.

Pour observer les courans qui résultent de l'action d'un acide sur un alcali, M. Becquerel verse l'acide dans une cuiller de platine, et il prend dans une pince de platine le morceau de soude ou de potasse qu'il veut soumettre à l'épreuve; alors, la pince et la cuiller étant mises en communication avec les extrémités du multiplicateur, on plonge l'alcali dans l'acide pour compléter le circuit.

Dans toutes les actions de cette nature, que l'on peut varier à l'infini, on observe constamment que l'élément acide dégage l'électricité positive et l'élément basique l'électricité négative.

Lorsque, dans une dissolution saline, un élément cède sa place à un autre, on observe toujours des effets élec-

triques analogues aux précédens : ainsi lorsque, dans une dissolution de sulfate de cuivre, on plonge à quelque distance l'une de l'autre deux lames attachées aux deux bouts du multiplicateur, l'une de zinc et l'autre de cuivre, on observe un courant très énergique, et l'on voit en même temps le zinc passer à l'état de sulfate de zinc pour prendre la place du cuivre, et celui-ci se revivifier sur la lame de cuivre.

On donne encore plus d'intensité au courant en disposant l'expérience de la manière suivante, comme l'a fait M. Becquerel, qui a, le premier, analysé tous ces phénomènes chimiques avec autant de bonheur que de persévérance (*Ann. de Chim. et de Phys.*, *t.* 41, *p.* 1). Dans un vase de verre ou de porcelaine, on dispose une cloison avec une membrane de vessie; d'un côté, on met une dissolution de sulfate de zinc et une lame de zinc, et de l'autre une dissolution de sulfate de cuivre et une lame de cuivre : la réaction est à peu près nulle tant qu'il n'y a entre ces liquides d'autre communication que celle qui s'établit par la cloison; mais, aussitôt que les lames de zinc et de cuivre sont liées entre elles par un métal quelconque, par exemple par le fil d'un multiplicateur, le zinc est vivement attaqué, tandis que le cuivre du sulfate de cuivre est revivifié sur la lame de cuivre elle-même; il se produit en même temps un courant très énergique, qui reste constant si l'on a soin d'ajouter du sulfate de cuivre solide pour maintenir la dissolution au même point de saturation.

C'est sur ce principe que l'on a construit une pile non moins remarquable par sa puissance que par la constance de ses effets : l'un des élémens de cette pile est représenté dans la fig. 466; il se compose d'un cylindre creux de cuivre rouge très mince *a*, lesté avec du sable *b*, et fermé de toutes parts; le fond inférieur *c* est plan, et le fond supérieur *d* est conique; au-dessus de celui-ci s'élève un rebord *e*, percé de plusieurs trous *f*; ce cylindre s'engage dans une vessie *g*, qui vient se lier autour du rebord *e*, mais au-dessus des trous *f*.

On verse sur le cône *d* une dissolution saturée de sulfate de cuivre, qui coule par les trous et qui vient remplir tout l'espace compris entre la vessie et le cylindre; ensuite, on met sur le même cône des fragmens de sulfate de cuivre, que l'on renouvelle à mesure qu'ils se dissolvent dans le liquide qui doit toujours les baigner un peu : un manchon de zinc *h*, qui est fendu sur sa longueur pour s'élargir à volonté, est plongé dans une dissolution de sulfate de zinc ou de chlorure de sodium contenue dans un vase *i* de verre ou de faïence; on met le cylindre de cuivre dans le manchon de zinc, et les deux bandes de cuivre *p* et *n*, soudées l'une au cylindre et l'autre au manchon, représentent les deux pôles de l'élément; dès qu'on établit entre elles une communication métallique, on obtient un courant d'une très grande intensité.

Une pile de six élémens pareils peut, par exemple, rougir un fil de platine de 12 ou 15 centimètres de longueur, et de plus de $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre; elle peut agir pendant cinq ou six heures avec une intensité constante: ce qui l'empêche d'agir plus long-temps, c'est le cuivre revivifié, qui adhère au cylindre et qui finit par remplir la vessie.

Pour distinguer les piles de cette espèce, nous les appellerons piles cloisonnées; et l'on conçoit qu'il soit possible d'en former de pareilles avec la plupart des métaux, mis en contact avec leurs dissolutions.

Ce serait ici le lieu d'examiner la question du développement de l'électricité par le simple contact, conformément à la théorie de Volta, que nous avons adoptée (*n*os. 220 et *suivans*). Cette question a été vivement controversée dans ces derniers temps; quelques physiciens ont attaqué la théorie de Volta par une foule d'expériences assez intéressantes : M. Auguste de la Rive, de Genève, s'est surtout distingué dans cette controverse, en démontrant d'une manière rigoureuse que, dans un très grand nombre de cas, l'électricité que l'on avait attribuée au contact est réellement due à des

actions chimiques parfaitement évidentes; d'une autre part M. Pfaff a soutenu l'ancienne théorie avec beaucoup de sagacité. Sans entrer ici dans cette discussion, qui nous entraînerait trop loin dans le domaine de la chimie, nous ferons remarquer que les phénomènes thermo-électriques ne peuvent en aucune sorte être rapportés à des actions chimiques; et ils suffisent pour démontrer qu'au contact des corps hétérogènes il peut du moins se développer, au moyen de la chaleur, des effets électriques d'une très grande intensité. C'est ce seul motif qui nous a décidé à conserver encore la théorie de Volta dans l'exposition des premières expériences galvaniques; mais il est impossible de douter maintenant que, dans toutes les piles hydro-électriques dont nous avons parlé, si l'action chimique n'est pas la cause exclusive du développement de l'électricité, elle ne soit au moins la cause la plus efficace, et de beaucoup la plus prédominante. Ainsi, dans la pile cloisonnée que nous venons de décrire, si le contact concourt au développement de l'électricité, il n'y concourt certainement que pour une portion infiniment petite de la quantité totale de l'électricité qui est mise en circulation, comme nous le verrons dans l'un des chapitres suivans, où nous indiquerons les moyens de comparer entre elles les quantités d'électricité qui constituent les courans.

Les phénomènes électriques qui se développent dans les décompositions chimiques sont précisément inverses de ceux qui se développent dans l'acte de la composition ou de la combinaison des élémens. Ce résultat général a été établi dans mon deuxième *Mémoire sur l'Origine de l'Électricité atmosphérique* (*Annales de Chimie et de Physique*, *t.* 36, *p.* 1). Après avoir démontré que les changemens d'état des corps ne donnent jamais aucun signe électrique, je fais voir que l'électricité apparaît aussitôt qu'il y a dans une dissolution quelques élémens chimiques qui se séparent. Mon appareil est le condensateur représenté dans la figure 425 : seulement, à la plaque de laiton l'on peut substituer une tige ter-

minée par un anneau; sur la plaque ou dans l'anneau de la tige, on dispose un creuset de platine préalablement porté à une température plus ou moins haute, depuis 40 ou 50 degrés jusqu'au rouge ou au rouge blanc, et, dans ce creuset, on projette quelques gouttes des dissolutions que l'on veut soumettre à l'épreuve : les élémens volatils se dégageant, il y a ségrégation chimique et développement d'électricité ; la charge du condensateur est quelquefois si grande qu'on l'observe sans faire communiquer au sol, et que les lames d'or sont projetées contre les parois de la cloche presque aussitôt que le liquide tombe dans le creuset.

Dans les solutions alcalines, la vapeur d'eau a l'électricité négative et l'alcali a l'électricité positive.

Dans les solutions acides, au contraire, c'est l'eau qui est positive et la solution restante qui est négative.

En opérant par d'autres procédés, M. Becquerel a constaté que, dans les doubles compositions, il n'y a pas de signes électriques (t. 2, p. 81) : en effet, si la décomposition tend à dégager une certaine quantité de fluide, la recomposition tend à dégager une égale quantité de fluide contraire; ainsi, en versant une dissolution de nitrate de baryte dans une dissolution de sulfate de potasse, ni la dissolution de nitrate de potasse ni le précipité de sulfate de baryte ne doivent être électrisés.

Actions physiologiques et poissons électriques.

271. Pour compléter l'examen des causes diverses qui peuvent développer de l'électricité, nous avons à parler encore des *poissons électriques* et des phénomènes extraordinaires qu'ils représentent.

On sait depuis long-temps que la torpille a la propriété de frapper d'engourdissement la main qui la touche; quelquefois même la commotion est assez violente pour déterminer dans toute la longueur du bras une paralysie douloureuse

qui dure plusieurs minutes, et qui peut être comparée à ce qu'on éprouve quand on se frappe le coude. Pour expliquer ces effets, l'on disait autrefois que la torpille *lance des molécules engourdissantes*, ou qu'elle agit comme un *ressort* qui se débande, ou comme un *corps sonore* qui est en vibration rapide (*Réaumur*, *Académie des Sciences*, 1714). Mais, lorsque Muschenbroeck ressentit pour la première fois les effets de la bouteille de Leyde, il eut l'heureuse idée de comparer cette commotion à celle de la torpille, et d'attribuer ainsi à la même cause des phénomènes dont l'origine semblait si différente : c'est alors seulement que la torpille et les autres poissons analogues, que l'on appelait en général *trembleurs*, furent appelés à juste titre *poissons électriques*; on en compte maintenant 7 appartenant à des genres différens : *Torpedo narke risso*; *T. unimaculata*; *T. marmorata*; *T. galvanii*; *silurus electricus*; *Tetraodon electricus*; *gymnotus electricus*.

Quelle est l'origine de la prodigieuse quantité d'électricité que peuvent donner ces poissons ? C'est une question d'un très grand intérêt, qui paraît malheureusement avoir été négligée par les plus habiles observateurs : cependant nous sommes portés à admettre que cette électricité est le résultat d'une *action physiologique particulière* ; car, dans l'ensemble des faits connus, nous ne trouvons rien qui autorise à penser qu'elle soit produite par des actions mécaniques ou par la chaleur, ou par des actions chimiques analogues à celles que nous venons d'examiner : toutefois, dans l'impossibilité d'établir cette opinion sur des bases certaines, faute d'expériences directes, nous n'entreprendrons ici aucune discussion à ce sujet, et nous nous contenterons de résumer les principaux phénomènes qui ont été observés sur la torpille et le gymnote.

272. *Propriétés de la torpille.*—C'est à Walsh que nous devons les premières recherches un peu précises sur les effets de la torpille; ses expériences furent faites à La Ro-

chelle en 1772 et à l'île de Ré (*Journal de Physique*, *t.* IV, *p.* 205); il en tire les conséquences suivantes :

Quand la torpille est en l'air, on reçoit la commotion en touchant directement une partie quelconque de sa peau, soit par un seul doigt, soit par toute la largeur de la main.

On reçoit pareillement les commotions lorsqu'on la touche avec un bon conducteur; par exemple, avec une tige de métal de plusieurs pieds de longueur.

La commotion est arrêtée par tous les mauvais conducteurs; ainsi, on peut toucher impunément la torpille avec du verre, de la résine, etc.

On peut même la toucher sans danger avec une petite bande d'étain collée sur du verre, pourvu qu'il se trouve dans l'étain une solution de continuité aussi petite qu'on puisse la faire avec la pointe d'un canif.

Quand plusieurs personnes *non isolées* se tiennent par la main, et que la première, seule, touche la torpille, la commotion se fait sentir à la seconde et même à la troisième, mais elle diminue d'intensité.

La commotion se fait sentir dans un cercle de vingt personnes non isolées qui se tiennent par la main, quand la première personne touche la torpille sous le ventre, tandis que la dernière la touche sur le dos, ou *vice versâ*.

Voilà les principaux résultats que l'on obtient dans l'air; la dernière expérience réussirait peut-être en touchant deux points quelconques qui ne soient pas opposés, comme Walsh semble l'exiger, sans doute à cause de l'analogie qu'il cherche à établir entre les bouteilles de Leyde et les torpilles. Dans l'eau, les commotions ont toujours moins d'intensité que dans l'air, mais elles se produisent encore de la même manière et sous les mêmes conditions. L'eau étant un assez bon conducteur, on conçoit qu'une torpille vive et énergique puisse agir à distance, et qu'alors il ne soit pas nécessaire de la toucher directement. Walsh a en effet observé qu'elle *foudroie* à distance de petits poissons, ou au moins qu'elle les étourdit ou qu'elle les enivre.

Dans tous les cas, la commotion que lance la torpille est pour elle un phénomène volontaire: il arrive souvent qu'on la touche à plusieurs reprises sans rien obtenir; mais, lorsqu'on l'irrite en lui pinçant les nageoires, on est à-peu-près assuré de recevoir des coups redoublés; Walsh a compté jusqu'à cinquante décharges en une minute.

MM. Becquerel et Breschet ont fait plusieurs observations très intéressantes sur les torpilles de Chioggia non loin de Venise (*Becquerel, t. 4, p.* 364) : ils ont constaté par exemple, au moyen d'un bon galvanomètre, que le courant va toujours du dos au ventre en passant par le galvanomètre; ils ont pareillement vérifié de nouveau que la torpille peut faire à volonté passer la décharge par tels ou tels points de ses surfaces supérieures et inférieures.

M. Matteucci, qui a fait plus récemment encore des expériences très curieuses sur les torpilles de l'Adriatique, a trouvé le moyen de rendre l'étincelle parfaitement visible : pour cela il applique deux armatures métalliques, l'une sur le dos et l'autre sur le ventre de la torpille; puis il dispose en même temps deux feuilles d'or très près l'une de l'autre, et dont chacune est mise en communication avec l'une des armatures: alors, aussitôt qu'on irrite la torpille, on voit briller l'étincelle entre les deux feuilles d'or.

M. Matteucci a pareillement confirmé l'observation importante de MM. Becquerel et Breschet sur le sens du courant; il a constaté de son côté que le dos est positif, et le ventre négatif.

Nous regrettons de ne pouvoir donner de plus amples détails sur ces diverses recherches, qui jetteront sans doute beaucoup de jour sur les propriétés électriques et physiologiques de la torpille.

273. *Propriétés du gymnote.* — Le gymnote électrique, que l'on appelle aussi l'*anguille de Surinam*, est doué d'une puissance électrique encore plus grande que celle de la torpille. Walsh fit venir de Surinam des gymnotes, sur lesquels

il confirma les résultats qu'il avait obtenus de la torpille quelques années auparavant ; mais, de plus, il fit cette observation curieuse, que la commotion du gymnote peut se transmettre d'un conducteur à un autre au travers d'une petite lame d'air, et qu'alors on voit briller une étincelle électrique. (*Journ. de Phys.*, t. VIII, p. 305.)

M. de Humboldt a fait, en Amérique, avec M. Bonpland, un grand nombre d'expériences sur le gymnote. Voici ce qu'il rapporte, dans son ouvrage, des habitudes de ce poisson singulier et des moyens de le pêcher.

« Nous partîmes, le 9 mars, de grand matin, pour le petit village de *Rastro de Abaxo* : de là, les Indiens nous conduisirent à un ruisseau qui, dans le temps des sécheresses, forme un bassin d'eau bourbeuse entouré de beaux arbres, de clusia, d'amyris et de mimoses à fleurs odoriférantes. La pêche des gymnotes avec des filets est très difficile à cause de l'extrême agilité de ces poissons qui s'enfoncent dans la vase comme des serpens. On ne voulut point employer le *barbasco*, c'est-à-dire les racines du *pis cidia erithryna*, du *jacquinia armillaris* et de quelques espèces de *phyllanthus* qui, jetées dans une mare, enivrent ou engourdissent les animaux : ce moyen aurait affaibli les gymnotes. Les Indiens nous disaient qu'ils allaient *pêcher avec des chevaux*. Nous eûmes de la peine à nous faire une idée de cette pêche extraordinaire ; mais bientôt nous vîmes nos guides revenir de la savane, où ils avaient fait une battue de chevaux et de mulets non domptés ; ils en amenèrent une trentaine qu'on força d'entrer dans la mare.

» Le bruit extraordinaire causé par le piétinement des chevaux fait sortir les poissons de la vase et les excite au combat. Ces anguilles, jaunâtres et livides, semblables à de grands serpens aquatiques, nagent à la surface de l'eau, et se pressent sous le ventre des chevaux et des mulets ; une lutte entre des animaux d'une organisation si différente offre le spectacle le plus pittoresque. Les Indiens, munis de harpons et de roseaux longs et minces, ceignent étroitement la

mare; quelques uns d'entre eux montent sur les arbres, dont les branches s'étendent horizontalement au dessus de la surface de l'eau; par leurs cris sauvages et la longueur de leurs joncs, ils empêchent les chevaux de se sauver en atteignant la rive du bassin. Les anguilles, étourdies du bruit, se défendent par la décharge réitérée de leurs batteries électriques; pendant long-temps elles ont l'air de remporter la victoire. Plusieurs chevaux succombent à la violence des coups invisibles qu'ils reçoivent de toutes parts dans les organes les plus essentiels à la vie; étourdis par la force et la fréquence des commotions, ils disparaissent sous l'eau; d'autres, haletant, la crinière hérissée, les yeux hagards, et exprimant l'angoisse, se relèvent et cherchent à fuir l'orage qui les surprend. Ils sont repoussés par les Indiens au milieu de l'eau. Cependant un petit nombre parvient à tromper l'active vigilance des pêcheurs; on les voit gagner la rive, broncher à chaque pas, s'étendre dans le sable, excédés de fatigue et les membres engourdis par les commotions électriques des gymnotes.

» En moins de cinq minutes, deux chevaux étaient noyés. L'anguille, ayant cinq pieds de long et se pressant contre le ventre des chevaux, fait une décharge de toute l'étendue de son organe électrique : elle attaque à la fois le cœur, les viscères et le *plexus cœliacus* des nerfs abdominaux. Il est naturel que l'effet qu'éprouvent les chevaux soit plus puissant que celui que le même poisson produit sur l'homme lorsqu'il ne le touche que par une des extrémités. Les chevaux ne sont probablement pas tués, mais simplement étourdis. Ils se noient, étant dans l'impossibilité de se relever par la lutte prolongée entre les autres chevaux et les gymnotes.

» Nous ne doutions pas que la pêche ne se terminât par la mort successive des animaux qu'on y emploie. Mais peu à peu l'impétuosité de ce combat inégal diminue : les gymnotes fatigués se dispersent; ils ont besoin d'un long repos et d'une nourriture abondante pour réparer ce qu'ils ont perdu de

force galvanique : les mulets et les chevaux parurent moins effrayés, ils ne hérissaient plus la crinière, leurs yeux exprimaient moins d'épouvante : les gymnotes s'approchaient timidement du bord des marais, où on les prit au moyen de petits harpons attachés à de longues cordes. Lorsque les cordes sont bien sèches, les Indiens, en soulevant le poisson dans l'air, ne ressentent point de commotions. En peu de minutes nous eûmes cinq grandes anguilles, dont la plupart n'étaient que légèrement blessées; d'autres furent prises vers le soir par le même moyen.

» La température des eaux dans lesquelles vivent habituellement les gymnotes est de 26° à 27°. On assure que leur force électrique diminue dans les eaux plus froides; et il est assez remarquable en général, comme l'a déjà observé un physicien célèbre, que les animaux doués d'organes électromoteurs, dont les effets deviennent sensibles à l'homme, ne se rencontrent pas dans l'air, mais dans un fluide conducteur de l'électricité. Le gymnote est le plus grand des poissons électriques ; j'en ai mesuré qui avaient cinq pieds à cinq pieds trois pouces de long. Les Indiens assuraient qu'ils en avaient vu de plus grands encore. Nous avons trouvé qu'un poisson qui avait trois pieds dix pouces de long pesait douze livres. Le diamètre transversal du corps était (sans compter la nageoire anale, qui est prolongée en forme de carène) de trois pouces cinq lignes. Les gymnotes du *Cano* de Bera sont d'un beau vert d'olive : le dessous de la tête est jaune mêlé de rouge; deux rangées de petites taches jaunes sont placées symétriquement le long du dos, depuis la tête jusqu'au bout de la queue; chaque tache renferme une ouverture excrétoire : aussi la peau de l'animal est constamment couverte d'une matière muqueuse, qui, comme Volta l'a prouvé, conduit l'électricité vingt à trente fois mieux que l'eau pure. Il est, en général, assez remarquable qu'aucun des poissons électriques découverts jusqu'ici dans les différentes parties du monde ne soit couvert d'écailles. »

En opérant sur ces poissons, dont les batteries sont si puissantes, M. de Humboldt n'a pu découvrir aucune action directe sur les électromètres les plus sensibles, et aucun phénomène de lumière électrique.

274. *De l'organe électrique.* — Dans les divers poissons électriques, l'organe dans lequel se développe l'électricité a sensiblement la même texture et les mêmes apparences, quoique différent par sa forme, par sa grandeur et par sa disposition. Nous essaierons seulement de donner une idée de l'organe de la torpille, qui a été l'objet des recherches les plus précises. Cet organe se divise en deux parties symétriquement placées de chaque côté de la tête et appuyées contre les branchies; elles occupent l'une et l'autre toute l'épaisseur qui sépare les deux plis de la peau. Lorsqu'on en fait la dissection, on voit qu'il est composé d'un tissu cellulaire extrêmement lâche, à grandes mailles, qui affecte la forme d'un cylindre ou plutôt d'un prisme de cinq à six pans. On en fait une comparaison sensiblement exacte, en disant qu'il ressemble aux alvéoles d'un rayon de miel; seulement les cloisons ne sont pas de minces membranes, mais plutôt des fibres, séparées et tendues dans des sens différens.

On compte ordinairement dans chaque organe quatre à cinq cents de ces petits prismes, et il paraît que Hunter en a compté une fois jusqu'à onze cent quatre-vingt-deux. Ils sont à peu près perpendiculaires à la direction de la peau, à laquelle ils sont fortement adhérens par leurs deux extrémités. Si l'on observe en détail la structure de chacun de ces prismes, on y distingue une foule de lames minces perpendiculaires à l'axe, séparées l'une de l'autre, et ajustées enfin comme les divers élémens d'une pile. Ces petits feuillets distincts, tantôt plans, tantôt ondulés, sont séparés par des couches muqueuses très adhérentes; mais, en pressant un organe, on ne peut faire sortir aucune quantité sensible de fluide.

Quatre faisceaux nerveux d'un grand volume viennent se

distribuer dans l'organe, et, d'après M. Matteucci, le siège de la puissance électrique paraît être dans le renflement qui leur donne naissance.

Cette organisation a certainement des rapports frappans avec les piles de Volta; mais il faudrait des observations anatomiques plus précises, des expériences physiques et physiologiques plus nombreuses, pour porter jusqu'à l'évidence ces analogies qui se présentent d'une manière si séduisante; il faudrait surtout s'attacher à reconnaître si l'accumulation de l'électricité dans les organes électriques est le résultat d'une action physiologique volontaire; et distinguer, s'il y a lieu, les influences sous lesquelles l'appareil se charge, et les influences sous lesquelles il se décharge par des modes qui semblent essentiellement différens. C'est là sans doute ce que des expériences ultérieures ne tarderont pas à nous apprendre.

CHAPITRE V.

Phénomènes d'induction.

275. Les *phénomènes d'induction* résultent d'une action extrêmement remarquable que les courans exercent sur les corps conducteurs pour y développer des courans particuliers au moment où ces corps conducteurs s'approchent des courans et au moment où ils s'en éloignent. Ces phénomènes ont été découverts par M. Faraday, en 1831, et ils méritent la plus grande attention, soit à cause de leur importance théorique, soit à cause des nombreuses séries de faits dont ils donnent le principe. Les nouveaux courans qui sont ainsi excités dans les corps conducteurs par l'action ou par l'influence de courans quelconques, ont été appelés *courans d'induction* ; on pourrait aussi les appeler *courans instantanés* ou *temporaires*, parce qu'ils ne durent qu'un instant ; et si l'on voulait les désigner par rapport à leur origine, comme on a fait pour les courans thermo-électriques ou hydro-électriques, on pourrait les appeler *courans magnéto-électriques* ou *courans électro-électriques*, puisqu'ils doivent leur naissance soit au magnétisme, soit à l'électricité. Nous conserverons toutefois le nom de *courans d'induction* qui paraît adopté par la plupart des physiciens, et nous allons essayer d'exposer l'ensemble des résultats généraux auxquels on est parvenu jusqu'à ce jour sur ce sujet.

276. Nous démontrerons d'abord une proposition générale qui résume avec exactitude les faits les plus fondamentaux de l'induction; cette proposition est la suivante:

Lorsqu'un circuit conducteur fermé commence *à recevoir dans quelques uns de ses points l'action d'un courant quelcon-*

que, il est traversé par un courant inverse ; *lorsqu'il* cesse *de recevoir cette action, il est traversé par* un courant direct ; *enfin* pendant *qu'il reçoit cette action* d'une manière constante, *il n'est traversé par* aucun courant *et n'éprouve aucune modification apparente sensible.*

Nous allons indiquer les expériences par lesquelles on démontre la vérité de cette proposition, lorsque le circuit fermé est soumis à l'action d'un aimant, ou à l'action d'un courant, ou à l'action de la terre.

1° *Circuit soumis à l'action d'un aimant.* Un fil métallique couvert de soie, de 100 ou 200 mètres de longueur est enroulé sur une bobine de bois ou de métal (*fig.* 429), dont l'ouverture intérieure est assez grande pour recevoir un aimant, les deux extrémités de ce fil communiquent avec les deux extrémités d'un galvanomètre suffisamment éloigné, et à l'instant où l'on introduit le pôle d'un aimant dans l'intérieur de la bobine, on voit l'aiguille du galvanomètre qui est déviée avec plus ou moins de force ; mais bientôt elle revient au repos, pendant tout le temps que l'aimant reste en place, et si l'on enlève l'aimant elle s'agite de nouveau dans le sens opposé. La déviation de l'aiguille donne le sens du courant d'induction qui traverse le circuit composé du galvanomètre et de la bobine. Il est facile de reconnaître que ce courant est inverse et marche en sens contraire de celui de l'aimant lorsque l'aimant *commence* à agir, et qu'il est direct et marche dans le même sens que celui de l'aimant quand l'aimant *cesse* d'agir ou quand on le retire de la bobine.

Lorsque le galvanomètre est très sensible il n'est pas nécessaire d'enrouler un aussi long fil sur la bobine ; on peut même quelquefois se dispenser d'un fil replié sur lui-même, et montrer l'effet d'une manière plus simple avec un seul fil qui joint les deux bouts du galvanomètre pour fermer le circuit : alors, en approchant vivement de ce fil un aimant pour l'éloigner et le rapprocher ensuite, on détermine des oscillations très apparentes dans l'aiguille du galvanomètre. On

conçoit que des expériences de cette nature peuvent être variées à l'infini.

2° *Circuit fermé soumis à l'action d'un courant.* Sur une bobine analogue à la précédente on enroule simultanément deux fils couverts de soie (*fig.* 431) : l'un est destiné à laisser passer le courant d'une pile plus ou moins forte, l'autre est destiné à recevoir l'action *inductive* de ce courant; les extrémités de ce second fil sont par conséquent unies avec les deux extrémités du fil du galvanomètre. Quand les communications sont établies, on fait passer le courant par le premier fil, et à l'instant l'aiguille du galvanomètre accuse dans le second fil un courant d'induction inverse, c'est-à-dire qui marche en sens contraire du courant inducteur ; puis elle revient au zéro et reste stationnaire : mais, lorsqu'on rompt le circuit de la pile, elle se dévie de nouveau et accuse dans le second fil un courant d'induction direct, c'est-à-dire marchant dans le même sens que celui de la pile.

3° *Circuit fermé soumis à l'action de la terre.* On a obtenu quelques phénomènes en soumettant à la seule action de la terre des fils roulés en hélices plus ou moins longues ou pliés en rectangle, dont on change alternativement la position (*Ann. de Chim.*, t. 50, p. 116 et 124; *Bibl. universelle*, t. 49, p. 136); mais ces phénomènes n'ont pas été assez complètement analysés pour que nous puissions les discuter ici.

Dans la première des expériences que nous avons indiquées, le circuit fermé commence à recevoir l'action de l'aimant à mesure que l'aimant s'avance, et il cesse de la recevoir à l'instant où l'aimant s'éloigne. Mais l'action magnétique peut commencer et cesser d'une autre manière : elle peut commencer au moment où les fluides magnétiques se décomposent, et cesser à l'instant où ils se recomposent; or, la proposition générale s'applique encore à ce cas, comme on va le voir par l'expérience suivante :

ab est un fort aimant en fer-à-cheval (*fig.* 430) ; *mcn* est

une pièce de fer doux pliée aussi en fer-à-cheval, dont les deux branches sont enveloppées d'un grand nombre de tours d'un même fil; le sens du fil doit être tel qu'en y faisant passer un courant les deux branches *m* et *n* prennent des pôles contraires; les deux extrémités de ce fil sont réunies à une distance suffisante du fer et de l'aimant, et une simple aiguille aimantée est soumise à l'action de ce circuit fermé. Alors, si l'on approche l'aimant *ab* très vivement des branches *m* et *n*, l'aiguille accuse un courant inverse, et, si l'on éloigne l'aimant, elle accuse un courant direct. Ainsi, la décomposition et la recomposition des fluides magnétiques développent des courans inverses et directs dans le circuit fermé qui est soumis à leur action.

Il est facile de voir que ce n'est pas l'influence directe des pôles sur les replis du fil qui donne naissance à ce courant d'induction : car ce courant acquiert une telle intensité que, si l'on approche seulement les deux extrémités du fil à une très petite distance l'une de l'autre, on voit briller entre elles une vive étincelle, soit quand on approche l'aimant *ab* du fer doux *mcn*, soit quand on l'en éloigne; cette étincelle électrique est donc produite par la seule action magnétique. De même, lorsqu'on tient le fil avec la main nue, on reçoit une commotion qui peut être comparée à celle d'une petite bouteille de Leyde, si l'aimant est assez puissant.

Les courans qui se développent ainsi par la décomposition et la recomposition des fluides magnétiques, sont assez forts pour qu'une barre de fer doux entourée d'un fil en hélice excite dans ce fil un courant très intense lorsque, après l'avoir placée dans la direction de l'aiguille d'inclinaison, on la retourne de manière à mettre en bas le bout qui était en haut, ou *vice versâ*.

Dans la deuxième des expériences qui servent à démontrer la proposition générale, le courant inducteur commence d'agir lorsque le courant commence à parcourir le premier fil, et il cesse d'agir au moment où le courant cesse; on pour-

rait donc supposer que les effets sont produits par quelques modifications qui accompagnent soit l'établissement, soit la cessation du courant. Pour lever les doutes, M. Faraday a démontré par quelques expériences que l'on obtient exactement les mêmes résultats lorsqu'un courant étant établi d'une manière permanente dans un fil, on approche ou l'on éloigne de ce fil inducteur un autre fil destiné à recevoir l'induction.

Aussi, quand nous disons que l'action *commence* sur un circuit fermé, il faut entendre ou que le courant inducteur commence en effet à s'établir, ou qu'étant déjà établi d'une manière permanente il commence à agir parce qu'il s'approche plus près du circuit fermé, ces deux modes d'action produisant des effets complètement analogues. De même, quand nous disons que l'action *cesse* sur un circuit fermé, il faut entendre ou que le courant conducteur cesse en effet parce qu'il cesse d'exister, ou qu'il cesse d'agir parce qu'il s'éloigne du circuit fermé.

277. *Réaction des plis d'une hélice.* A la proposition générale que nous venons de développer, nous devons encore ajouter un fait qui pourrait sans doute s'en déduire directement si l'on connaissait mieux les conditions mécaniques du mouvement des fluides qui constituent les courans; ce fait est l'augmentation d'éclat ou plutôt le développement très remarquable que prend l'étincelle électrique lorsqu'on rompt un circuit composé d'un grand nombre des circonvolutions du même fil, très rapprochées l'une de l'autre.

Concevons une pile ordinaire composée d'une douzaine d'élémens même très faibles : on sait qu'elle ne pourra donner qu'une très petite étincelle lorsqu'on joindra les deux fils qui lui servent de pôles, ou lorsqu'on viendra à les séparer après les avoir unis pendant quelques instans. Cette étincelle sera sensiblement la même, si on ajoute au circuit un fil de 100 ou 200 mètres étendu en ligne droite ou replié sur lui-même de manière que les plis soient éloignés l'un de l'autre

de quelques millimètres : mais, si ce fil additionnel est replié en hélice ou enroulé sur une bobine , on observe alors une étincelle incomparablement plus large lorsqu'on vient à rompre le circuit ; son éclat est décuple ou peut-être centuple de ce qu'il était d'abord. Ce phénomène singulier ne peut être attribué sans doute qu'à la réaction que les différens plis de l'hélice exercent entre eux au moment où le courant cesse.

En même temps que l'étincelle se développe ainsi, la commotion que l'on reçoit à la rupture du courant acquiert pareillement une intensité extraordinaire. Voici quelques expériences qui feront mieux voir tout ce qu'il y a d'important dans ce phénomène.

On peut au moyen des courans transformer le fer doux en aimant d'une très grande puissance ; ces aimans particuliers, qui ne tirent leur force que de la présence du courant, peuvent se faire et se défaire en un instant, autant de fois que l'on veut, puisqu'il suffit pour cela de faire passer le courant et de l'interrompre ; on les appelle par cette raison *électro-aimans*. Les figures 432 et 433 représentent un électro-aimant que j'ai construit en 1831, et qui porte aisément plus de mille kilogrammes quand on lui donne le courant avec une forte pile de 24 paires ; il se compose de deux fers-à-cheval opposés, formés avec des barres rondes de 8 à 10 centimètres de diamètre et de 60 à 80 centimètres de longueur totale ; les deux branches de chaque fer-à-cheval sont enveloppées d'environ mille mètres de fil de cuivre de deux tiers de millimètres d'épaisseur. C'est le même courant qui traverse successivement les deux mille mètres de fil, mais les hélices sont formées de telle sorte que les pôles de noms contraires se trouvent en présence. Aussitôt que le courant est établi, l'électro-aimant fixe *ab* soulève l'électro-aimant mobile *a'b'*, et ils s'appliquent l'un contre l'autre avec tant de force que l'on peut charger le plateau *cdl* (*fig.* 432) d'un poids énorme qui dépasse souvent mille kilogrammes. Lorsqu'on vient ensuite à rompre les communications en soule-

vant hors du mercure les deux extrémités *n* et *p* du fil de deux mille mètres, on voit briller une très large étincelle, tandis que la pile elle-même ne donne qu'une étincelle à peine visible, et, si l'on prend avec les mains un peu humides ces 2 extrémités pour les tirer hors du mercure, on reçoit une commotion presque foudroyante, comme je l'ai éprouvé à mon cours en 1832, par inadvertance ou plutôt sans savoir qu'il dût se produire un effet pareil ; cette expérience est, je crois, la première où l'on ait observé le développement considérable de l'étincelle et l'intensité de la commotion (*Bull. de la Soc. Philom.* Année 1831, page 117).

M. Masson a étudié les effets de cette commotion, et il a imaginé une très heureuse disposition pour la reproduire rapidement à des intervalles très rapprochés. Pour cela, il emploie une roue dentée métallique ordinaire dont l'axe est pareillement métallique, et il lui imprime un mouvement de rotation plus ou moins rapide au moyen d'un rouet et d'une poulie. L'un des pôles de la pile communique à l'axe de la roue, l'autre pôle communique à l'un des bouts du fil d'un électro-aimant, tandis que l'autre bout du même fil aplati en ressort vient toucher les dents de la roue. Ainsi, quand la roue est en repos, le courant passe ou ne passe pas, suivant que le ressort touche une dent ou se trouve logé dans l'intervalle de deux dents consécutives ; il en est de même pendant que la roue est en mouvement, par conséquent en la faisant mouvoir on a un courant intermittent. Or, il est facile de voir d'abord qu'au moment de l'intermittence, c'est-à-dire à l'instant où le ressort quitte une dent pour passer à la suivante, il se produit à cette solution de continuité une large étincelle. Ensuite, si l'on met une main sur l'axe de la roue et l'autre sur le ressort, on éprouve une très vive secousse à chaque intermittence, parce que les deux bras complètent alors le circuit dans lequel doit passer le courant d'induction qui résulte d'une part de la recomposition des fluides magnétiques de l'électro-aimant, et d'une autre part de la réaction

des différens tours de la spire les uns sur les autres. Pendant le contact du ressort avec les dents de la roue, le corps, à raison de sa mauvaise conductibilité, n'est traversé que par un courant extrêmement faible qui ne peut produire aucune commotion.

M. Masson a constaté qu'avec une pile assez faible il suffit de quelques minutes pour foudroyer un chat, en l'exposant comme nous venons de le dire, aux secousses répétées du courant d'induction. Les effets dépendent toutefois de la longueur du fil de l'électro-aimant et de la vitesse de rotation de la roue dentée, car, dans l'appareil dont il s'agit, une trop grande vitesse affaiblit l'intensité des secousses au point de les rendre presque nulles. (*Comptes-Rendus de l'Acad. des Sciences*, *t.* 4, p. 456.)

278. *Appareil électro-moteur produisant tous les effets de la pile.* D'après ce que nous venons de dire sur les lois générales des courans d'induction, l'on comprend combien il est facile, bien qu'ils soient instantanés par leur nature, de les rendre en quelque sorte continus pour mieux observer tous les phénomènes qu'ils sont capables de produire. En effet, *a* et *b* (*fig.* 434) représentant le pôle austral et le pôle boréal d'un aimant ordinaire, supposons qu'au-dessus de cet aimant se trouve un électro-aimant dont, pour plus de simplicité, nous ne représenterons que les extrémités inférieures *m* et *n*, ainsi que l'axe vertical *c* autour duquel il peut tourner, et examinons, par exemple, les phénomènes qui vont se produire dans la branche *m* pendant qu'elle décrit une circonférence entière en partant de la position *m'* et en passant successivement en *m*, *n'* et *n* : de *m'* en *m* le fluide boréal du fer doux de cette branche est attiré, le fluide austral repoussé, et il en résulte dans le fil un courant inverse du courant du pôle austral *a*; de *m* en *n'*, les deux fluides tendant à se recomposer, le courant devient direct ; de *n'* en *n* le fluide austral est attiré, le courant est inverse de *b* et par conséquent le même qu'en *n'* ; de *n* en *m'* le fluide austral tend à se recom-

poser, le courant est direct avec *b* et inverse de *a* ; d'où il suit enfin que dans toute la demi-circonférence comprise entre *m* et *n* en passant par *n'* le courant du fil de la branche *m* marche dans un sens, et que dans toute la demi-circonférence comprise entre *m* et *n* en passant par *m'* il marche en sens inverse. Ce que nous venons de dire de la branche *m* s'applique à la branche *n*. Donc, pour avoir un courant continu ou à peu près, il suffit d'imprimer à l'électro-aimant un mouvement de rotation rapide, et de recueillir seulement le courant qui se produit pendant le passage de l'une de ses branches par l'une des demi-circonférences comprises entre *m* et *n* ; ou bien encore de recueillir le courant qui se produit dans les deux demi-circonférences, mais d'en changer la direction au moyen d'une bascule pour le faire arriver dans les corps où l'on veut le faire agir.

Ces principes ont été réalisés d'abord par Pixii fils, dans un grand appareil qu'il nous a fait pour la Faculté des sciences; mais, depuis, d'autres constructeurs ont établi des appareils plus portatifs, et nous allons décrire ici celui de M. Clarke, qui a l'avantage de produire de grands effets, quoique très réduit dans ses dimensions.

L'appareil de Clarke est représenté dans les figures 435 et 436, il se compose principalement d'un aimant fixe en fer-à-cheval dont on ne voit qu'une moitié *ac* dans la coupe de la figure 435 : devant cet aimant tourne l'électro-aimant *m n*, dont une branche est vue en élévation et l'autre en coupe ; ses armatures sont faites seulement avec 40 mètres d'un fil de cuivre ayant au moins 1 millimètre d'épaisseur. Cet électro-aimant se visse sur l'axe de rotation, qui est lui-même mis en mouvement au moyen de la grande roue *d* et de la petite poulie *f* sur laquelle passe la corde *g*.

L'une des extrémités du fil qui forme l'armature communique avec l'axe *h*, et l'autre extrémité avec l'espèce de virole *i* qui est isolée de l'axe : ainsi, l'axe *h* et la virole *i* sont les deux pôles de cette nouvelle pile. Dans le support *k*, re-

présenté en perspective (*fig.* 436) se trouvent deux petites caisses en cuivre, *r* et *s*, remplies de mercure : lorsque ces caisses communiquent au moyen du fil *t*, et qu'en même temps le petit ressort *x* apporte à la caisse *r* l'électricité de la virole *i*, il est évident que les deux pôles de la pile se trouvent l'un sur l'axe *h* et l'autre à l'extrémité du fil *y*. Alors, en montant sur l'axe la petite pièce excentrique *z*, le contact cesse lorsque ses deux arêtes échappent au fil *y*, et l'on voit briller une très vive étincelle à chaque demi-révolution; pour obtenir le maximum d'effet, le contact doit cesser à peu près quand l'électro-aimant est vertical.

On peut de même adapter à l'appareil une petite pièce (*fig.* 437) portant un fil de platine très fin et très court, qui rougit sensiblement par le passage du courant.

On peut ainsi adapter à l'extrémité de l'axe une pièce à deux pointes (*fig.* 438) qui donne de très belles étincelles lorsque ses pointes, pendant leurs révolutions, touchent du mercure contenu dans un vase de métal communiquant à l'autre pôle de l'appareil; on peut enfin de la même manière allumer de l'éther très facilement.

Pour obtenir des effets chimiques et physiologiques, il faut à l'électro-aimant précédent en substituer un autre dont les armatures soient faites avec un fil très fin de 1500 mètres de longueur. Alors, à la pièce excentrique *z* on substitue aussi sur l'axe la pièce *u* (*fig.* 439) qui n'établit la communication entre les pôles que pendant une demi-circonférence ; par ce moyen l'hydrogène et l'oxigène se trouvent séparés.

Enfin, en prenant de chaque main les cylindres à commotion (*fig.* 440) après les avoir mis en contact avec les deux pôles de l'appareil au moyen de fils plus ou moins longs, on reçoit des commotions qui deviennent insupportables quand le mouvement de rotation est assez rapide.

279. *Phénomènes magnétiques qui semblent se développer dans les corps conducteurs lorsqu'ils se meuvent sous l'influence des aimans.* C'est à M. Arago que nous devons la

verte de ces phénomènes, dont M. Faraday donne une explication très heureuse en les considérant comme des phénomènes d'induction. Nous rapporterons d'abord les principales observations de M. Arago, et nous essaierons d'indiquer ensuite comment M. Faraday est parvenu à les expliquer.

L'appareil que M. Arago a employé dans ses recherches est représenté dans les figures 441 à 444. *h* (*fig.* 442) est une horloge tout en cuivre, excepté deux ou trois petits pivots qui sont en acier; elle est portée sur un trépied de bois, très solide, qui peut être mis d'aplomb au moyen de vis calantes. Cette horloge est destinée à imprimer un mouvement de rotation très rapide à un axe vertical *x* (*fig.* 443): l'axe communique le mouvement à une pièce *tt'* à trois branches, qui est représentée plus en grand dans la figure 444; c'est sur cette pièce que l'on ajuste les disques qui doivent servir aux expériences; ils se centrent d'eux-mêmes au moyen d'un petit trou qui reçoit le prolongement de l'axe de rotation, et ils sont arrêtés à leur contour, sur les branches de la pièce *tt'*, par une petite pièce mobile que serre une vis de pression. On peut mettre à volonté trois volans *v* qui s'inclinent plus ou moins, suivant le degré de vitesse auquel on veut s'arrêter. Reste à présent à soumettre l'aiguille à l'influence du disque tournant. Pour cela, on place autour de l'horloge une table à quatre pieds *pp'*, percée en son centre d'une ouverture un peu plus grande que les disques; sous cette ouverture on colle une feuille de papier *ll'* (*fig.* 442), et sur la table elle-même on pose une cloche *c*, dans laquelle on suspend l'aiguille *gg'* au moyen d'un fil de soie *f*. L'aiguille peut être élevée ou abaissée en tournant le treuil *t* dans un sens ou dans l'autre.

Le poids de plomb *k* met l'horloge en mouvement; un bouton sert à l'arrêter, et un compteur indique le nombre des tours, qui peut être de 8 à 10 par seconde; il y a même un timbre qui sonne à chaque centaine, et, par là, on peut

aisément reconnaître l'instant où la vitesse de rotation est devenue à peu près uniforme.

Voici maintenant les phénomènes que l'on observe : tout étant en repos, et l'aiguille dirigée dans le méridien magnétique, on tourne le bouton d'arrêt, et le disque entre en mouvement; sa vitesse de rotation est d'abord très petite, mais elle prend une accélération rapide, et bientôt l'aiguille est déviée comme si elle tendait à suivre le disque dans ses révolutions successives. Cependant, cette force d'entraînement est balancée en partie par la force magnétique de la terre, qui rappelle l'aiguille dans le méridien; de telle sorte que le rapport de ces forces détermine la position d'équilibre. La force entraînante du disque croît avec sa vitesse de rotation : par conséquent, pour une faible vitesse, l'aiguille s'arrête, par exemple, à 10° de déviation; pour une vitesse plus grande à 20°; et l'on peut ainsi, en modifiant les vitesses et en les soutenant uniformes, arrêter l'aiguille dans toutes les positions obliques à l'égard du méridien, depuis 0 jusqu'à 90°. Mais, dès que la vitesse est assez grande pour entraîner l'aiguille au-delà de cette déviation de 90°, il n'y a plus de point de repos : l'aiguille tourne avec le disque, et tend à prendre elle-même toute la vitesse de rotation dont il est animé. Telle est la force magnétique toujours croissante que prennent les corps en mouvement. Voici maintenant ce qu'on observe à son égard.

Cette force décroît à mesure que la distance augmente; car l'aiguille, qui tourne d'un mouvement *continu* lorsqu'elle n'est séparée du disque que par l'épaisseur de la feuille de papier qui ferme la cloche, n'éprouve plus, lorsqu'on la soulève graduellement, que des *déviations déterminées*, diminuant toujours à mesure que la distance devient plus grande. Il est bien entendu que la vitesse de rotation du disque reste la même dans toutes ces épreuves comparatives.

Cette même force donne naissance à trois composantes :

La première est *perpendiculaire aux rayons du disque*, c'est celle que nous venons d'observer ;

La deuxième est *perpendiculaire au plan du disque* : on en constate l'existence au moyen d'une aiguille verticale suspendue à l'un des fléaux d'une balance ; cette aiguille est toujours repoussée, quel que soit celui de ses pôles qui se trouve au dessus du disque tournant, et près de ses bords.

La troisième agit *dans le sens des rayons du disque*, et on en reconnaît les effets de la manière suivante : on dispose une aiguille d'inclinaison de manière qu'elle soit verticale et que son plan de rotation passe par le centre du disque ; alors, en la déplaçant sur un même rayon, la pointe de l'aiguille peut correspondre à tous les points de ce rayon ou de son prolongement. Or, quand la pointe de l'aiguille tombe au dehors du disque, elle est repoussée loin du centre de rotation ; cette force répulsive diminue à mesure qu'on avance l'aiguille vers le centre, elle est nulle à une certaine distance de ce point, et se change ensuite en force attractive pour redevenir nulle au centre lui-même.

Ainsi, sur chaque rayon du disque, il y a un point, entre la circonférence et le centre, où la force dont il s'agit est nulle ; au-delà elle est répulsive, et plus près du centre elle est attractive. C'est ce qui est indiqué dans la figure 443, où les lignes ponctuées marquent les directions primitives de l'aiguille.

MM. Herschell et Babbage, dans un très beau travail sur ce sujet, établissent l'ordre suivant pour l'action de différens métaux. Celle du cuivre est prise pour unité.

Cuivre	1,00	Zinc	0,03
Etain	0,46	Antimoine	0,09
Plomb	0,25	Bismuth	0,02

L'argent paraît doué d'une grande force, l'or d'une très faible ; le mercure se place entre l'antimoine et le bismuth.

Lorsqu'un disque offre des solutions de continuité ou des

fentes dans le sens de ses rayons, il perd une grande partie de sa force; et l'on doit aussi à MM. Herschell et Babbage cette remarque curieuse, qu'en ressoudant les bords avec un métal quelconque, même avec du bismuth, quand le disque est de cuivre, on lui rend presque la totalité de la force qu'il avait perdue. Mais, en remplissant seulement ces intervalles avec des poudres métalliques bien pressées, ou avec des liquides tels que l'eau ou l'acide sulfurique, on ne parvient pas à réparer sensiblement ses pertes d'intensité.

Enfin, MM. Herschell et Babbage ont encore constaté les deux faits suivans : 1° que les écrans de substances non magnétiques (c'est-à-dire non magnétiques à la manière du fer ou de l'acier) n'exercent aucune influence lorsqu'on les place entre l'aiguille aimantée et les disques tournans; 2° qu'un disque en mouvement n'a aucune puissance pour entraîner un disque en repos; ce qui prouve que ce n'est pas le mouvement lui-même qui décompose les fluides magnétiques, et qu'il n'agit que pour agrandir les effets des fluides préalablement décomposés.

M. Barlow a constaté que le fer en mouvement agit à la manière des autres métaux, mais avec beaucoup plus d'énergie.

Voici maintenant les principes d'après lesquels ces phénomènes et tous les autres analogues paraissent s'expliquer de la manière la plus satisfaisante.

Lorsqu'au lieu d'une aiguille mobile on suspend au dessus du disque tournant un aimant fixe et assez énergique, on reconnaît bientôt que le disque est traversé par des courans électriques dont la direction est très remarquable : c'est Nobili et Antinori qui paraissent avoir fait l'analyse la plus complète de ces courans (*Ann. de Chim. et Phys.*, t. 50, p. 280). Pour plus de simplicité, nous ne considérerons qu'un seul pôle (*fig.* 445); la flèche *f* indiquant le sens de rotation du disque, on observe aisément, avec les deux extrémités du fil du galvanomètre, qu'il y a de chaque côté du pôle des cou-

rans dont le sens est indiqué par la direction des flèches. On voit donc que les parties du disque qui arrivent sous le pôle prennent des courans opposés à ceux qui constituent l'aimant au point le plus voisin, et qu'au contraire les parties du disque qui viennent de passer sous le pôle et qui s'en éloignent prennent des courans marchant dans le même sens que ceux de l'aimant, dans les points qui sont les moins éloignés d'elles, conformément à la proposition générale (276).

On comprend alors que les attractions et les répulsions qui s'établissent entre ces courans d'induction et les courans constitutifs des aimans, qui sont ici les courans inducteurs, doivent nécessairement donner naissance à des forces capables de mouvoir les aimans, quand les aimans sont mobiles. Lorsqu'en effet on fait l'analyse complète de ces forces, on reproduit tous les résultats découverts par M. Arago et par les autres observateurs. Pour ce qui regarde le sens des mouvemens, cette analyse est facile, et il est inutile de la développer ici : mais, pour ce qui regarde l'intensité des effets produits, il est impossible de la tenter avec le secours seul des résultats qui sont jusqu'à présent connus.

Le magnétisme terrestre ne peut manquer d'exercer sur les disques tournans une action analogue à celle des aimans; plusieurs observateurs ont, en effet, constaté l'existence des courans qu'il développe, lorsque la rotation des disques a lieu dans des plans plus ou moins inclinés au méridien magnétique : mais ces phénomènes n'ont pas encore été variés et discutés avec l'attention qu'ils méritent.

Cependant, nous ne pouvons pas quitter ce sujet sans rappeler encore la conséquence générale qui se déduit de l'ensemble des faits que nous avons rapportés: c'est qu'il est presque impossible de faire mouvoir un corps conducteur sans y développer des courans d'induction plus ou moins intenses, soit par l'influence des aimans ou des substances magnétiques qui avoisinent le corps, soit par l'influence du magnétisme terrestre qui fait partout sentir son action.

CHAPITRE VI.

Lois générales de l'intensité des courans électriques.

280. Nous allons essayer de présenter dans ce chapitre les points les plus essentiels des recherches que nous avons faites sur la mesure des courans électriques, dans le but surtout de donner une idée des différens procédés d'expérimentation que nous avons employés, et de faire comprendre les lois générales auxquelles nous sommes parvenus. Nous traiterons séparément des courans thermo-électriques, des courans hydro-électriques, et de la détermination de la quantité d'électricité qui est nécessaire pour décomposer un gramme d'eau.

Courans thermo-électriques.

281. *L'intensité du courant est la même dans tous les points de circuit qu'il traverse.* Lorsqu'on fait passer un courant thermo-électrique dans un circuit composé de fils de différens métaux et de différens diamètres, l'intensité du courant est toujours la même dans tous les points du circuit; pour le démontrer, on peut disposer les différens fils du circuit horizontalement sur une ligne perpendiculaire au méridien magnétique, et faire osciller une même aiguille aimantée au dessus des différens points que l'on veut examiner. Si l'on a soin, dans chaque expérience, de placer l'aiguille exactement au dessus du fil et à la même distance de son axe, on trouve qu'elle fait partout le même nombre d'oscillations dans le même temps; d'où il résulte bien que l'intensité est partout la même.

On peut encore diriger le circuit dans le méridien magné-

tique et le ramener sur lui-même, en sorte qu'il y ait de chaque point deux courans contraires ; alors, en présentant une aiguille ordinaire de déclinaison en un point quelconque de cette double ligne, il est facile de reconnaître qu'elle n'est jamais déviée, et par conséquent que les courans contraires ont bien partout des intensités égales.

La source électrique qui nous paraît la plus commode pour ces expériences et pour les suivantes est un cylindre de bismuth représenté dans la figure 446, aux deux extrémités duquel on soude un fil de cuivre de 1 mètre de longueur, l'une des soudures est maintenue, par exemple à 0, et l'autre à 100°, puis l'on complète le circuit arbitrairement avec des fils quelconques.

282. *L'intensité du courant est en raison inverse de la longueur du circuit et en raison directe de sa section.* La source électrique restant la même, et le circuit étant aussi composé de la même substance, l'intensité du courant est en raison inverse de la longueur du circuit et en raison directe de sa section. Pour le démontrer, on prend deux cylindres pareils, coulés dans le même moule, et on les dispose comme le représente la figure 447 ; ensuite on choisit une bobine de fil de cuivre, bien homogène et couvert de soie, on soude, à chaque bout des cylindres, un mètre de ce fil ; alors, pour reconnaître l'égalité des 2 sources électriques, on fait passer leurs courans en sens inverse dans un galvanomètre différentiel (237) dont les fils soient parfaitement égaux. Si l'aiguille reste immobile, les sources sont égales, car les deux circuits sont identiques. Cela posé, on construit un autre galvanomètre avec du fil de la même bobine, en prenant deux bouts différens, l'un, par exemple, de 8 mètres, et l'autre de 98. Ces longueurs, ajoutées aux 2 sources thermo-électriques, donneront deux circuits : l'un ayant une longueur totale de 10 mètres du même fil, plus la longueur du bismuth, qui peut être négligée comme nous le verrons plus loin ; l'autre, ayant une longueur totale de 100 mètres.

Avec le circuit de dix mètres on fait deux tours sur un cadre de multiplicateur, et vingt tours avec le circuit de 100 mètres ; alors, en faisant passer les courans en sens inverse, l'aiguille reste immobile. Donc, le circuit 10 fois plus long est réellement 10 fois plus faible, puisqu'il doit agir par un nombre de tours dix fois plus grand pour compenser l'effet du circuit le plus court. On peut comparer de même des circuits ayant entre eux des rapports quelconques de longueur; mais il faut que les fils soient bien homogènes, ce qui n'arrive pas toujours, car, sur la même bobine, on trouve parfois des parties voisines ayant des conductibilités notablement différentes.

C'est par le même procédé que l'on arrive à constater que l'intensité est proportionnelle à la section, soit en composant l'un des circuits avec trois ou quatre fils pareils, soit en prenant un fil plus gros dont on a fait *tirer* une partie en fil plus fin, soit même en laminant un fil pour montrer que la surface n'a aucune influence. Il est facile de reconnaître aussi que l'étendue de la soudure ne modifie pas les résultats, pourvu que tous ses points prennent bien la même température.

283. *Conductibilité des différens métaux.* Pour déterminer la conductibilité relative des différens métaux, on se sert d'un galvanomètre différentiel très sensible et des deux sources thermo-électriques égales de l'expérience précédente (*fig.* 447). Soient *ab* et *cd* (*fig.* 448) les bouts des cylindres de bismuth, *e* le galvanomètre différentiel, *f* une règle divisée de 2 ou 3 mètres de longueur, *g* un fil de platine tendu sur la règle, et *h* le fil d'épreuve dont on veut comparer la conductibilité à celle du fil de platine. Ces différens fils sont disposés comme on le voit sur la figure, et remplissent d'ailleurs les conditions suivantes :

1° Les courans des deux sources passent en sens contraire dans le galvanomètre;

2° Les circuits seraient composés de la même manière et

devraient être d'une égalité parfaite, si les longueurs du fil de platine et du fil d'épreuve étaient réduites à zéro;

3° On peut changer à volonté la longueur du fil de platine, et c'est par là qu'on l'amène à affaiblir son courant autant que le fil d'épreuve h affaiblit le sien.

Pour remplir cette dernière condition, le fil de platine est disposé comme on le voit sur la figure 449 : le poids p lui donne une tension constante, et le curseur i, qui est un morceau de liège, le laisse passer dans une fente longitudinale ; mais le fil du galvanomètre se fixe avec un peu de cire sur le bord du curseur et plonge avec le fil de platine dans le mercure qui remplit la cavité centrale. En déplaçant le curseur à droite ou à gauche, on diminue ou l'on augmente la longueur du fil de platine, et l'on arrive aisément à ramener au zéro l'aiguille du galvanomètre. Ce point une fois trouvé, il suffit de déplacer le curseur de quelques millimètres pour imprimer à l'aiguille une déviation sensible; ainsi, on ne peut pas se tromper sur la longueur du fil de platine qui est capable d'équilibrer le fil d'épreuve.

Connaissant alors la section et la longueur du fil d'épreuve, la section et la longueur employées du fil de platine, il est facile de comparer leurs conductibilités : car, si ces fils ont le même diamètre, leur conductibilité est évidemment proportionnelle à leur longueur; et, s'ils ont la même longueur, elle est en raison inverse des sections. En général, si l'on désigne par x la conductibilité du fil d'épreuve, par s' sa section et par l' sa longueur, puis par 1 la conductibilité du fil de platine, par s sa section et par l la longueur qu'il faut lui donner pour équilibrer le fil d'épreuve, on aura :

$$x = \frac{l'}{l} \cdot \frac{s}{s'}.$$

Les sections se déterminent avec une grande exactitude en mesurant au sphéromètre les diamètres des fils.

Comme le platine n'est jamais pur, il m'a semblé nécessaire

de rapporter toutes les conductibilités à celles du mercure distillé. Pour cela on emploie au lieu du fil d'épreuve un tube de verre parfaitement cylindrique, et dont on détermine le diamètre par des pesées ; les extrémités de ce tube *ab* (*fig.* 456) viennent s'engager dans deux bouchons, ou plutôt dans deux vases de verre assez larges *c* et *d*, et l'expérience s'accomplit comme la précédente. Le tableau suivant contient les résultats qui ont été obtenus par ce procédé.

Tableau de la conductibilité des métaux.

Noms des substances.	Diamètre du fil.	Longueurs soumises à l'expérience.			Conductibilité.
	mm.	mill.	mm.	mill.	
Palladium.	0,176	1900	1200	500	5791
Argent 963 de fin. .	0,174	2000	1500	200	5152
Argent 900	0,194	id.	id.	id.	4753
Argent 857	0,178	1200	800	400	4221
Argent 747	0,179	1200	600	»	3882
Or pur	0,176	600	300	»	3975
Or 951	0,176	600	300	»	1338
Or 751	0,176	400	200	»	714
Cuivre pur . . .	0,182	2000	1000	500	3838
Id. recuit . .	id.	id.	id.	id.	3842
Platine.	0,186	800	600	300	855
Laiton	0,182	»	»	»	200 900
Acier fondu . . .	»	»	»	»	800 500
Fer.	»	»	»	»	700 600
Mercure.	»	»	»	»	100

Le palladium, le platine, l'or, l'argent et le cuivre, ont été purifiés à la monnaie : je les dois à la bienveillante amitié de M. d'Arcet et de M. Bréant ; les autres métaux ont été

pris dans le commerce ou préparés directement et alliés en diverses proportions.

On voit que le palladium est le plus conducteur des métaux ; viennent ensuite l'argent, l'or et le cuivre : le mercure est le plus mauvais conducteur des corps que j'ai soumis à l'expérience ; sa conductibilité est presque soixante fois moindre que celle du palladium.

La présence des substances étrangères altère singulièrement la conductibilité ; ce serait un excellent moyen de reconnaître la pureté des métaux.

Le laiton, l'acier et le fer ont été soumis à un grand nombre d'expériences ; j'ai rapporté seulement les limites entre lesquelles tous les résultats se trouvent compris.

La température n'a qu'une faible influence sur la conductibilité de certains corps : par exemple, de 0 à 100°, le mercure ne varie que de quelques centièmes : mais, entre les mêmes limites, le fer et l'acier éprouvent une prodigieuse variation, leur conductibilité est souvent réduite au tiers ; la simple chaleur de la main produit des effets très sensibles, et, ce qui semble encore plus étonnant, c'est qu'il suffit de faire rougir une étendue de quelques millimètres sur la longueur d'un fil de fer ou d'acier pour que sa conductibilité devienne trois ou quatre fois moindre.

La conductibilité du bismuth ne peut pas être déterminée avec une grande exactitude, parce qu'il est trop difficile d'en couler des tiges minces d'une grande longueur, surtout lorsqu'elles doivent être homogènes et de même diamètre ; mais les essais que j'ai faits à cet égard m'ont démontré cependant que les cylindres pareils à celui de la figure 446 ne sont équivalens qu'à quelques centimètres d'un fil de cuivre de $\frac{1}{2}$ millimètre de diamètre : c'est précisément à cause de la mauvaise conductibilité du bismuth que j'ai été conduit à ne l'employer jamais qu'en cylindre d'une très grande section, car c'est sous cette condition seulement qu'il est possible de négliger la longueur qu'il représente dans le circuit. Les cy-

lindres ayant en effet 25 millimètres de diamètre et environ 300 millimètres de longueur, on voit que leur section est 2500 fois plus grande que celle d'un fil de cuivre de $\frac{1}{2}$ millimètre; par conséquent, si le bismuth avait la même conductibilité que le cuivre, le cylindre de 300 millimètres n'affaiblirait pas plus le courant qu'un fil de cuivre de $\frac{1}{2}$ millimètre d'épaisseur et de $\frac{3}{25}$ de millimètre de longueur, et si le bismuth avait une conductibilité 100 fois moindre que le cuivre, ce cylindre ne serait encore équivalent qu'à 12 millimètres d'un fil de cuivre de $\frac{1}{2}$ millimètre d'épaisseur.

Ces principes vont nous servir à exprimer par une formule très simple l'intensité du courant produit par une source thermo-électrique quelconque, pourvu que l'on connaisse les sections, les longueurs, et les conductibilités des différentes parties du circuit que ce courant doit traverser.

284. *Intensité du courant dans un circuit simple et homogène.* L'intensité d'un courant thermo-électrique étant en raison inverse de la longueur du circuit et en raison directe de sa section et de sa conductibilité, il est évident que, si l'on présente à une même source thermo-électrique successivement deux circuits différens,

L'un ayant une longueur l, une section s, et une conductibilité c,

L'autre ayant une longueur l', une section s', et une conductibilité c',

On aura :

$$x = t. \frac{s'}{s}. \frac{c'}{c}. \frac{l}{l'}$$

en désignant par t l'intensité du courant qui se développe dans le premier circuit, et par x celle du courant qui se développe dans le second, car le deuxième courant est égal au premier multiplié par le rapport direct des sections, par le rapport direct des conductibilités et par le rapport inverse des longueurs. En effet, il devient double ou triple du premier,

si, les autres choses restant les mêmes, le rapport des sections est seulement double ou triple, ou si le rapport des conductibilités est seulement double ou triple, ou si le rapport des longueurs est seulement $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{3}$, etc., etc.

Ainsi, pour que le deuxième courant soit égal au premier, il suffit que l'on ait :

$$s'.c'.l = s.c.l',$$

condition qui peut être remplie d'une infinité de manières.

285. *Intensité du courant dans un circuit simple et hétérogène.*

Supposons, par exemple, que l'on présente à une même source thermo-électrique successivement deux circuits différens :

L'un homogène, ayant une longueur l, une section s et une conductibilité c ;

L'autre hétérogène, composé de diverses parties successives, c'est-à-dire formé, par exemple, avec un fil de cuivre, puis à la suite un fil d'or, puis un fil de fer, d'argent, de palladium, etc., etc.

Soit pour la 1re partie de ce circuit : l'' la longueur, s'' la section, c'' la conductibilité;
pour la 2e partie..... l''' *id.* s''' *id.* c''' *id.*:

Le courant d'intensité uniforme qui traverse toutes les parties et tous les élémens de ce circuit a la même intensité que s'il traversait un autre circuit homogène de longueur l', de section s', et de conductibilité c ; et il est facile de trouver la longueur inconnue l' que devrait avoir ce nouveau circuit pour être rigoureusement équivalent au circuit hétérogène dont il s'agit, lorsqu'on suppose donnée la section s' et la conductibilité c'.

En effet, pour remplacer la première partie par un fil de section s' et de conductibilité c', il suffirait de donner à ce fil une longueur

$$l''.\frac{s'.c'}{s''.c},$$

car sa longueur doit être double de l'', s'il a une section double ou une conductibilité double, etc.

Cette longueur d'un fil de section s' et de conductibilité c', *équivalente* à la longueur l'' de section s'' et de conductibilité c'', c'est-à-dire qui peut lui être substituée sans changer l'intensité du courant, est ce que nous appelons la *longueur réduite* de l'' ;

de même la longueur réduite de la deuxième partie sera :

$$l'''.\frac{s'.\ c'}{s'''.\ c'''};$$

et il en est de même de toutes les autres.

Or, si les diverses parties successives avaient réellement été remplacées par des longueurs

$$l''.\frac{s'.\ c'}{s''.\ c''},\quad l'''.\frac{s'.\ c}{s'''.\ c},\ \text{etc.}$$

d'un fil de section s' et de conductibilité c', la longueur l' du nouveau circuit serait évidemment égale à la somme de ces longueurs ;

On a donc

$$l' = \frac{l''.\ s'.\ c'}{s''.\ c''} + l'''.\ \frac{s''\ c''}{s'''\ c'''} + \text{etc.},$$

ou $$l' = s'\ c'\left(\frac{l''}{s''\ c''} + \frac{l'''}{s'''\ c'''} + \text{etc.}\right);$$

Par conséquent, en désignant par t l'intensité du courant, dans le circuit de longueur l, de section s et de conductibilité c, et par x l'intensité du courant donné par la même source dans le circuit hétérogène dont il s'agit, l'on a ;

$$x = t\frac{s'}{s}.\ \frac{c'}{c}.\ \frac{l}{l'}.;$$

et, si l'on prend $s' = s = 1$; $c' = c = 1$.

$$x = t\,\frac{l}{l'};$$

enfin, si l'on prend pour unité de longueur la longueur l, et pour unité d'intensité la valeur de t, l'on a

$$x = \frac{1}{\frac{l''}{s''c''} + \frac{l'''}{s'''c'''} + \text{etc.}}$$

Telle est la formule générale qui donne l'intensité du courant dans un circuit hétérogène quelconque, au moyen des longueurs des sections et des conductibilités des différens fils qui composent ce circuit.

286. *Courans complexes ou dérivés.* Un courant est donné par un élément bismuth et cuivre (*fig.* 450), dont les soudures sont r et r' ; il traverse d'abord le fil de cuivre $racbr'$, qui forme avec le bismuth un circuit simple ; ensuite, avec un autre fil de cuivre $a\,d\,b$, on vient établir des communications aux points a et b, et l'on se propose de déterminer tous les phénomènes d'intensité qui vont se développer par cette nouvelle addition que l'on fait au circuit. Il paraît naturel de supposer que le courant va se ramifier ou se décomposer au point a, qu'une partie continuera à passer directement de a en b par le premier fil c, tandis qu'une autre partie viendra prendre la nouvelle route qui lui est offerte par le fil additionnel $a\,d\,b$.

Nous appelons les points a et b, *points de dérivation*, et leur distance, comptée sur le fil, *distance* ou *intervalle de dérivation*; nous appelons de même le fil additionnel *adb fil de dérivation* parce qu'il vient en quelque sorte *dériver* une portion du courant pour l'obliger à suivre une autre voie.

Nous appelons *courant primitif* le courant qui existait avant que la dérivation fût faite ; *courant partiel*, la portion du courant qui passe actuellement par l'ancien fil $a\,c\,b$, entre

les points a et b; et *courant dérivé*, la portion du courant qui passe par le fil de dérivation $a\ d\ b$.

Comme il est d'ailleurs probable que l'effet de la dérivation se fera sentir sur le courant primitif lui-même, pour en modifier l'intensité, nous appelons *courant principal* le courant qui passe dans tout le reste du circuit lorsque la dérivation est faite; ainsi le courant principal est celui qui remplace le courant primitif.

Désignons par t l'intensité du courant primitif,
par x celle du courant principal,
par y celle du courant partiel,
par z celle du courant dérivé.

Cela posé, pour trouver, d'une manière générale, les valeurs de x, de y et de z, c'est à dire les intensités du courant principal, du courant partiel et du courant dérivé, au moyen de l'intensité t du courant primitif, il reste à exprimer les conditions qui caractérisent ces diverses intensités; et ces conditions sont évidemment la longueur du circuit primitif, l'intervalle de dérivation, la longueur et la section du fil de dérivation, car nous admettrons, pour l'instant, que l'on n'emploie que des fils de même conductibilité.

Représentons donc en général par l la longueur totale du circuit primitif, en faisant entrer dans la valeur de l, si cela est nécessaire, la *longueur réduite* du cylindre de bismuth.

Représentons par nl la distance des points a et b, ou l'intervalle de dérivation; cet intervalle n'est jamais qu'une fraction plus ou moins grande de la longueur totale du circuit, et il importe de le rapporter à cette longueur, plutôt que de l'exprimer en mètres ou en longueur absolue. Ainsi n est toujours une fraction plus petite que l'unité, exprimant le rapport qu'il y a entre l'intervalle de dérivation et la longueur totale du circuit; n sera $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{100}$, suivant que l'intervalle de dérivation sera $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{100}$ de la longueur totale du fil $r\ a\ c\ b\ r'$, augmentée de la longueur réduite du cylindre de bismuth.

Représentons, d'après les mêmes principes, par $k\,n\,l$, la longueur entière du fil de dérivation, désigné par $a\,d\,b$ sur la figure 450; ce qui signifie que cette longueur est égale à k fois l'intervalle de dérivation nl, en sorte que k peut être un nombre très grand ou une fraction plus petite que l'unité; k sera par exemple égal à 100 ou à $\frac{1}{100}$, suivant que la longueur du fil de dérivation sera égale à 100 fois l'intervalle $a\,b$ ou à $\frac{1}{100}$ de cet intervalle.

Représentons enfin par $\frac{s}{p}$ la section du fil de dérivation adb, s étant la section du fil acb; en sorte que p soit le rapport des sections de l'intervalle de dérivation et du fil de dérivation lui-même que nous supposons homogène dans toute sa longueur : p serait égal à 1, si les fils avaient le même diamètre; et il serait égal à 4, 9, 16, etc., si le fil de dérivation, plus fin que le fil ab, avait un diamètre $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, etc.

Ces définitions une fois établies, il est facile de trouver les valeurs de x, de y et de z; car il suffit pour cela d'appliquer les principes généraux à l'analyse des phénomènes qui se produisent.

En effet, le fil additionnel de longueur knl et de section $\frac{s}{p}$ produit sur le courant le même effet qu'un fil qui serait k fois plus court, et d'une section k fois plus petite; il pourrait donc être remplacé par un autre fil

de longueur nl et de section $\frac{s}{kp}$;

mais alors la communication entre les points a et b serait établie par deux fils de même longueur nl, mais de sections différentes :

le 1er ayant une section ..... s,

le 2e, une section..... $\frac{s}{kp}$;

ce qui est évidemment la même chose que si cette communi-

cation était établie par un seul fil

de longueur nl et de section $s + \frac{s}{kp} = \frac{s(kp+1)}{kp}$,

lequel fil peut, à son tour, être remplacé par un autre fil

de longueur $nl \frac{kp}{kp+1}$ et de section s.

Ainsi, l'effet de la dérivation est simplement de réduire l'intervalle de dérivation, qui était d'abord de longueur nl et de section s, à n'être plus que

de longueur $\frac{nl.kp}{kp+1}$ et de section s ;

par conséquent, après la dérivation, le circuit est le même que s'il avait

une longueur $l - nl + \frac{nl.kp}{kp+1}$ et une section s,

ou une longueur $\frac{l(kp+1-n)}{kp+1}$ et une section s.

Le courant principal x et le courant primitif t, ayant la même section et des longueurs différentes, sont entre eux en raison inverse des longueurs l et $\frac{l(kp+1-n)}{kp+1}$ qui composent leurs circuits ; on a donc enfin :

$$x = t. \frac{(kp+1)}{kp+1-n}.$$

Telle est la valeur du courant principal.

Maintenant, pour avoir les valeurs de y et de z, il suffit de remarquer qu'après avoir remplacé, comme nous l'avons fait, le fil de dérivation par un autre fil

de longueur nl et de section $\frac{s}{kp}$,

il est évident que la somme des intensités du courant partiel et du courant dérivé doit être toujours uniforme et toujours la même pour ses différens élémens ; ce qui donne

$$y + z = x$$

Il est pareillement évident que les intensités du courant partiel et du courant dérivé sont toujours entre elles comme les sections des fils dans lesquels ils passent, c'est-à-dire comme la section s est à la section $\frac{s}{pk}$, ce qui donne

$$\frac{y}{z} = kp \text{ ou } y = z.kp.$$

Au moyen de ces deux équations et de la valeur précédente de x, il est facile de voir que l'on a:

$$y = t.\frac{kp}{kp + 1 - n},$$

$$z = t.\frac{1}{kp + 1 - n}.$$

Ainsi, en dernier résultat, l'intensité x du courant principal, l'intensité y du courant partiel et l'intensité z du courant dérivé, sont données par les trois équations fondamentales:

$$x = t.\frac{(kp + 1)}{kp + 1 - n},$$

$$y = t.\frac{pk}{kp + 1 - n},$$

$$z = t.\frac{1}{kp + 1 - n}.$$

Bien que ces formules soient des conséquences directes des principes que j'ai précédemment établis et démontrés, sur les courans thermo-électriques, il m'a cependant semblé nécessaire de faire de nouvelles séries d'expériences extrêmement variées, soit pour confirmer encore le principe lui-

même, soit pour démontrer qu'il s'étend bien réellement et sans exception à tous les cas possibles.

Remarques sur les formules précédentes.

Valeur de n. n exprimant, comme nous l'avons dit, le rapport qui existe entre l'intervalle de dérivation et la longueur totale du circuit, il en résulte qu'en général la valeur de n n'est pas donnée directement, et qu'il faut pour la connaître avoir déterminé d'avance les longueurs réelles du circuit entier et de l'intervalle de dérivation. Sur quoi il faut observer que l'intervalle de dérivation peut être compté de deux manières, savoir : au dehors de la source, ou en y comprenant la source elle-même. Ainsi, dans la figure 450, cet intervalle est simplement ab, si on le compte hors de la source; et il serait $arr'b$, si l'on y comprenait la source elle-même : mais il est facile de voir qu'il doit essentiellement être compté sans y comprendre la source.

D'après cela, si le circuit est, par exemple, de 100 mètres, et que la distance des points de dérivation soit seulement de $0^{m},1$, on aurait :

$$n = 0,001.$$

Cette valeur de n peut alors être négligée et les formules deviennent :

$$x = t,$$
$$y = t.\ \frac{kp}{kp+1},$$
$$z = t.\ \frac{1}{kp+1}.$$

Ainsi, dans ce cas, le courant principal est égal au courant primitif, c'est-à-dire que le courant primitif n'est point altéré par la dérivation; mais le courant partiel et le courant dérivé conservent leur rapport général kp, qui dépend seulement des valeurs particulières de p et de k.

L'autre limite de la valeur de n est $n = 1$; ce qui arrive

quand on fait la dérivation aussi près de la source qu'il est possible, de manière que l'intervalle de dérivation soit égal au circuit lui-même; alors les formules générales deviennent :

$$x = t. \frac{(kp + 1)}{kp},$$

$$y = t,$$

$$z = t. \frac{1}{kp},$$

c'est-à-dire que, dans ce cas, le courant partiel est égal au courant primitif, ou, en d'autres termes, que toute l'électricité qui passait dans l'ancien circuit y passe encore sans aucune modification, et que la source donne directement au fil additionnel de dérivation toute la quantité d'électricité qui convient à sa longueur, à sa section et à sa conductibilité.

Par conséquent, si la longueur du fil de dérivation est alors égale à l'intervalle de dérivation, c'est-à-dire si l'on a $k = 1$, il en résulte :

$$z = t. \frac{1}{p};$$

d'où il suit que le courant dérivé est lui-même égal au courant primitif pour $p = 1$, qu'il est double pour $p = \frac{1}{2}$, etc., et que le courant principal ne cesse pas d'être égal à la somme du courant partiel et du courant dérivé ; ce qui revient à dire, en dernier résultat, que l'intensité du courant est proportionnelle à la section du circuit, et cela doit être.

Entre ces deux limites n peut prendre toutes les valeurs possibles.

Valeur de k. Dans les applications l'on connaîtra en général :

La longueur en mètres du circuit qui fait dérivation. Cette longueur, dans nos formules, étant représentée par knl, on voit qu'il suffira de diviser par la longueur en mètres de l'intervalle de dérivation pour avoir la valeur de k; on voit pareil-

lement que cette valeur reste constante, lorsqu'on augmente dans le même rapport l'intervalle de dérivation et la longueur du fil de dérivation ; pendant ces changemens, les valeurs relatives du courant principal, du courant partiel et du courant dérivé, restent les mêmes, mais leurs valeurs absolues pourront être un peu différentes si n ne reste pas très petit.

Lorsque, la longueur du fil de dérivation restant la même, on fait diminuer de plus en plus l'intervalle de dérivation, k prend des valeurs qui croissent de plus en plus et qui deviennent infinies quand l'intervalle devient nul, c'est-à-dire quand les deux points de dérivation sont excessivement rapprochés l'un de l'autre; on a alors :

$$x = t,$$
$$y = t,$$
$$z = o;$$

par conséquent, il n'y a plus de courant dans le fil de dérivation lorsque ses deux extrémités touchent deux points très voisins du circuit primitif.

Au contraire, à mesure que l'intervalle de dérivation augmente, le fil de dérivation restant toujours le même, les valeurs de k sont de plus en plus petites, et elles peuvent être très près de o quand le fil de dérivation est très court par rapport à l'intervalle de dérivation ; on a alors :

$$x = t.\frac{1}{1-n},$$
$$y = o,$$
$$z = t.\frac{1}{1-n};$$

par conséquent il n'y a plus de courant partiel sensible, toute l'électricité passe dans le fil de dérivation, et le courant dérivé est égal au courant principal, qui se trouve lui-même beaucoup plus grand que le courant primitif, et d'autant plus

grand que la valeur de n approche plus d'être égale à l'unité, ce qui doit être.

Valeur de p. p étant le rapport des sections du circuit primitif pris entre les points de dérivation et du fil de dérivation lui-même, on conçoit que la longueur totale du circuit doit essentiellement être évaluée en la ramenant à un fil homogène, qui aurait la conductibilité 1 et la section s du fil compris entre les points de dérivation ; par conséquent, si le circuit est hétérogène, il faut, avant tout, effectuer cette transformation pour avoir les valeurs de n, de k et de p.

Si l'on change en même temps et dans le même rapport les sections de l'intervalle de dérivation et du fil de dérivation, leurs longueurs restant les mêmes, la valeur de p reste constante, ainsi que la valeur de k; d'où il suit que les intensités relatives du courant principal, du courant partiel et du courant dérivé, restent les mêmes, mais leurs intensités absolues changent, parce que n change de grandeur.

Quand les valeurs de p et de k sont un peu grandes et que la valeur de n est petite, on a sensiblement :

$$z = \frac{1}{hp},$$

c'est-à-dire que dans ce cas le courant dérivé est proportionnel à la section du fil de dérivation.

Influence de la conductibilité. C'est seulement pour simplifier que nous avons supposé, dans l'établissement des formules, que la conductibilité du fil de dérivation était toujours la même que la conductibilité du circuit entre les points de dérivation : si cette condition n'était pas remplie, il serait très facile d'introduire dans les formules les modifications qui en résulteraient, car il suffirait de remarquer que, les effets de la conductibilité étant toujours les mêmes que les effets de la section, si l'on représente par c la conductibilité du circuit primitif, et par $\frac{c}{p'}$ celle du fil de dérivation, il y aurait à écrire partout dans les formules pp' au lieu de p.

Propriété remarquable des courans. Les considérations qui précèdent nous conduisent à une propriété très remarquable des courans électriques.

En effet, concevons un circuit thermo-électrique de dix mètres de longueur, formé par un cylindre de bismuth et par dix fils de la même substance mis bout à bout, ayant chacun un mètre de longueur, mais dont les sections soient différentes et croissent, par exemple, comme les nombres naturels 1, 2, 3, etc., 10; puis, supposons qu'avec un fil de même substance, ayant une longueur quelconque, de 20 mètres par exemple, et une section égale à celle qui est prise pour unité, l'on vienne successivement faire une dérivation aux extrémités de chacun des dix fils de un mètre qui composent le circuit. Il résulte des principes précédens que les valeurs de n seront différentes dans ces différens cas, mais elles seront toujours assez petites pour être négligées; k aura une valeur constante égale à 20, et p prendra des valeurs qui seront successivement 1, 2, 3 etc., 10. La dérivation se fait successivement aux extrémités des fils dont les sections sont 1, 2, 3, etc., 10; ainsi, le courant dérivé aura des intensités décroissantes qui seront :

$$\frac{1}{21}, \frac{1}{41}, \frac{1}{61} \text{ et } \frac{1}{201}.$$

C'est en effet ce que l'expérience confirme, je l'ai vérifié directement pour des sections qui étaient entre elles comme 1 est à 5 : mais, quand le rapport des sections était plus grand, il aurait fallu faire un trop grand nombre de tours sur le cadre du multiplicateur avec le fil du courant dérivé, et alors je comparais son intensité à celle d'un courant thermo-électrique produit par un autre appareil, et dont l'intensité était par exemple $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{20}$ de celle du courant principal.

Ainsi, dans un circuit thermo-électrique composé de fils de différentes sections, la force élémentaire du courant est la même dans tous les points; et cependant lorsqu'on prend des intervalles égaux sur ces différens fils, les courans déri-

vés que l'on en tire ont des intensités différentes qui sont à peu près en raison inverse des sections des fils dans l'intervalle de dérivation. Cette loi s'applique exactement aux courans qui traversent des fils hétérogènes ; mais alors il ne suffit plus de considérer les sections, il faut considérer aussi la conductibilité, en remarquant qu'un fil d'une certaine substance, ayant une section s' et une conductibilité c', produit exactement le même effet qu'un fil d'une autre substance ayant une section $\frac{s'c}{c}$ et une conductibilité c', tellement que, si la conductibilité c' est égale à $\frac{c}{2}$, la section du premier fil devra être double de celle du second pour produire le même effet. C'est ce qui a aussi été vérifié par l'expérience sur la plupart des substances qui peuvent être aisément réduites en fil. On obtient, par exemple, le même résultat, en dérivant aux extrémités d'un fil de cuivre de 1 mètre et de quatre dixièmes de millimètre de diamètre, et aux extrémités d'un fil de platine de 40 millimètres et de 182 millièmes de millimètre de diamètre.

Ainsi, sous la condition que l'on puisse négliger s par rapport à kp, l'on peut conclure en dernier résultat que l'intensité du courant dérivé est en raison directe de l'intervalle de dérivation, en raison inverse de la section du fil dans cet intervalle, et en raison inverse de sa conductibilité.

Dérivations multiples. Lorsque, après avoir fait une première dérivation, l'on vient en faire une seconde dans une autre portion du circuit, il est facile de trouver les intensités du courant principal définitif, et celles des deux courans partiels et des deux courans dérivés. Ce sont ces dérivations, faites à côté les unes des autres, par des fils différens, dans différentes portions du circuit primitif, que nous appelons *dérivations multiples*. Nous ne nous arrêterons pas à développer les formules générales qui expriment alors les inten-

sités des différens points du circuit, elles se déduisent aisément de ce qui précède.

287. *Théorie du multiplicateur appliqué au courant thermo-électrique.* Les lois précédentes conduisent aussi à déterminer la disposition qu'il convient de donner au multiplicateur pour qu'il ait la plus grande sensibilité possible. Quelques exemples suffiront pour faire comprendre à cet égard les principes généraux, et pour montrer que la construction du multiplicateur est tout à fait subordonnée au reste du circuit auquel il doit s'appliquer.

1° S'il s'agit d'appliquer un multiplicateur à un circuit qui doive avoir par lui-même une grande longueur, il est nécessaire de donner au multiplicateur un grand nombre de tours, et de le composer avec un fil qui ne soit pas très gros. Supposons, en effet, que le circuit soit, par exemple, équivalent à 100 mètres d'un fil de cuivre de $\frac{1}{10}$ de millimètre d'épaisseur, en ajoutant à ce circuit un multiplicateur composé avec 100 mètres du même fil, l'intensité du courant est seulement réduite à moitié; et avec ces 100 mètres on pourra faire sur le cadre un grand nombre de tours qui seront très rapprochés, et qui agiront sur les aiguilles avec une grande efficacité. Si l'on ne donne au fil du multiplicateur que 10 mètres de longueur, l'intensité du courant est les $\frac{10}{11}$ de l'intensité primitive, elle se trouve par conséquent moins réduite que dans le cas précédent; mais aussi, avec 10 mètres, on fera 10 fois moins de tours qu'avec 100 mètres, et il est évident que 10 tours, dont chacun a une intensité $\frac{1}{2}$, produisent sur les aiguilles beaucoup plus d'effet qu'un seul tour dont l'intensité est $\frac{10}{11}$. Si, au contraire, on emploie à faire le multiplicateur un fil de 100 mètres ayant 1 millimètre d'épaisseur, cette addition ne change presque rien à l'intensité du courant; car, à égale conductibilité, 100 mètres d'un millimètre d'épaisseur sont équivalens à 1 mètre d'un fil de $\frac{1}{10}$ de millimètre; le circuit devient donc de 101 mètres au lieu de 100; il semble en résulter que le fil de 1 milli-

mètre d'épaisseur donnera un effet presque cent fois plus grand sur les aiguilles, mais, comme ces tours prendront une épaisseur considérable, ils n'agiront pas avec autant d'efficacité que les tours du fil de $\frac{1}{10}$ de millimètre. On peut d'après cela apprécier l'influence de la longueur et de l'épaisseur du fil, on voit même combien il serait facile de transformer ces principes en formules rigoureuses.

2° S'il s'agit d'appliquer un multiplicateur à un circuit qui n'ait par lui-même qu'une très petite longueur, il faudra le composer avec un fil très gros et ne lui donner que très peu de tours; c'est ce que l'on voit aisément par un raisonnement analogue au précédent.

Ainsi, en dernier résultat, lorsqu'on est maître de réduire à volonté la longueur du circuit auquel on veut appliquer un multiplicateur, il est vrai de dire que le multiplicateur ne multiplie pas; car, en supposant que le reste du circuit puisse être négligé, il est évident que, pour avoir dix tours au multiplicateur, il faudra donner à son fil une longueur décuple qui réduira l'intensité du courant à sa dixième partie, en sorte qu'avec un seul tour dix fois plus intense on aurait le même résultat.

288. *Mesures des hautes températures.* J'ai essayé de mettre à profit les lois des courans thermo-électriques pour arriver à la construction d'un *pyromètre magnétique* qui pût servir à mesurer toutes les températures, depuis les plus grands degrés de froid jusqu'aux plus grands degrés de chaleur. Je dois donner ici une idée de cet appareil qui se compose de deux parties distinctes, savoir : le pyromètre lui-même, et la *boussole pyrométrique* qui sert à en marquer les indications.

Le *pyromètre* est représenté dans la figure 453 : *a b* est un tube de fer ou plutôt un canon de fusil; du milieu de la culasse *c* du fond, part un fil de platine qui est incorporé dans la masse du fer, et qui traverse l'axe du canon pour venir se souder à la pièce de cuivre rouge *x*; de la culasse annulaire *d*

part un second fil de platine qui vient se souder à la pièce de cuivre y ; le premier fil de platine est maintenu par un corps mauvais conducteur au milieu de l'ouverture de la culasse annulaire d, pour qu'il ne puisse pas la toucher; f est une pièce de bois fixée sur le bout du tube et destinée à porter les deux pièces de cuivre x et y.

La *boussole pyrométrique* se compose d'un multiplicateur m (*fig.* 454), formé avec un ruban de cuivre de 15 à 20 millimètres de largeur, et d'une aiguille de boussole ab (*fig.* 455) posée sur un pivot au milieu du multiplicateur; cette aiguille porte, perpendiculairement à sa longueur, une lame de bois cd sur laquelle on a tracé une ligne de repère qui sert à juger de la véritable position de l'aiguille elle-même. Le multiplicateur et son aiguille sont montés sur l'alidade mobile d'un cercle divisé. Quand le plan moyen du multiplicateur est exactement dans le méridien magnétique, l'appareil est au zéro, et le repère de l'index de l'aiguille tombe sous le fil d'une loupe ou d'une lunette qui est fixée au multiplicateur et qui l'accompagne dans tous ses mouvemens. Si maintenant on vient faire passer un courant dans le multiplicateur, l'aiguille est déviée, et l'on tourne l'alidade qui porte le multiplicateur jusqu'à ce que le fil de la lunette arrive au repère de l'aiguille : le cercle fixe indique de combien de degrés on a dû marcher pour arriver à ce point, et c'est la mesure exacte de la déviation. En opérant de la sorte, on est bien assuré que l'aiguille a toujours la même position à l'égard du courant : c'est pour cela que j'appelle cette boussole une *boussole de sinus*, parce que l'intensité du courant est alors mesurée par le *sinus de la déviation*. En effet, soit cm le méridien magnétique (*fig.* 451), c le centre de l'aiguille qui est aussi le centre de rotation, ca la position de l'aiguille, et d sa déviation: la composante de la force terrestre f, qui est dirigée suivant at et qui tend à la ramener au méridien, est $f.\ sin.\ d$; la force ϕ du courant agit toujours suivant az, ou perpendiculairement à l'aiguille, puisqu'il la suit dans ses mouvemens jusqu'à ce

que son plan vertical passe exactement par l'aiguille; on doit donc avoir :

$$\varphi = f \sin. d.$$

Ce moyen d'évaluer les intensités par les déviations est tout à la fois très commode et très rigoureux; il m'a été d'un grand secours dans mes recherches.

La communication entre le pyromètre et sa boussole s'établit au moyen de deux fils de cuivre d'environ 1 millimètre de diamètre, terminés par des chevilles de cuivre qui viennent se planter d'une part dans les pièces x et y du pyromètre, et de l'autre part dans les extrémités du ruban dont se compose le multiplicateur de la boussole.

L'extrémité a du pyromètre est destinée à être la soudure chaude, et, pour que le fer ne s'altère pas au feu, on la couvre d'un lut réfractaire.

Cet instrument a été gradué au moyen du pyromètre à air que nous avons décrit (131), et les dimensions en ont été combinées pour qu'une différence de température de 100° centigrades corresponde à une déviation angulaire de 4 à 5 degrés. Depuis plus de deux ans que cette graduation est faite, elle est restée parfaitement fidèle sans éprouver la moindre variation, bien que l'appareil ait été soumis plusieurs centaines de fois aux températures les plus hautes. On comprend que les indications de cette boussole sont indépendantes de l'état magnétique de l'aiguille, pourvu que ses pôles ne se déplacent pas d'une quantité trop considérable.

En opérant la graduation de plusieurs pyromètres analogues à celui qui vient d'être décrit, j'ai constaté ce fait remarquable, que l'intensité du courant est loin d'être proportionnelle à la température : la force électro-magnétique moyenne correspondant à chaque degré va en décroissant depuis la température ordinaire jusqu'à celle du *rouge naissant*, ensuite elle augmente pour reprendre à 1000 de-

grés environ l'intensité qu'elle avait près de zéro, et elle continue ainsi d'augmenter assez rapidement au delà de ce point (*Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*, décembre 1836).

289. *Intensité magnétique de la terre.* Si l'on peut parvenir à produire dans tous les temps et dans tous les lieux un courant électrique d'une intensité constante, il est évident que son action sur l'aiguille aimantée peut être comparée à l'action magnétique de la terre, et qu'elle en peut donner une mesure comparable très rigoureuse ; il suffit pour cela de bien définir les conditions dans lesquelles on fait agir cette force électro-magnétique. Nous allons indiquer ici le courant constant qui nous semble le plus facile à obtenir et les conditions sous lesquelles on peut le faire agir d'une manière parfaitement assurée.

Le cuivre et le bismuth sont deux métaux qui peuvent être aisément obtenus à l'état de pureté, et qui ont en outre l'avantage de donner naissance par leur contact à un courant thermo-électrique très énergique. La pureté du cuivre peut d'ailleurs être vérifiée *à posteriori*, car il suffit pour cela de comparer sa conductibilité à celle du mercure distillé. On peut donc regarder comme certain que du bismuth purifié et du cuivre éprouvé par sa comparaison avec le mercure donneront un courant parfaitement identique, lorsque ayant les mêmes dimensions ils auront juste aux deux soudures la même température, par exemple 0 et 100°. Les dimensions que j'ai adoptées sont : pour le bismuth le cylindre de la figure 446, ayant 20 millimètres de diamètre, 150 millimètres de longueur pour la partie droite, et 50 millimètres pour les deux appendices perpendiculaires ; et pour le cuivre un fil et de 1 millimètre de diamètre et de 20 mètres de longueur. Voilà le circuit rigoureusement défini, et le courant qui en résultera sera parfaitement constant dans tous les temps et dans tous les lieux lorsque la soudure froide sera mise à zéro, et la soudure chaude à 100°.

Voici maintenant les conditions qui m'ont paru les plus convenables pour faire agir ce courant sur l'aiguille aimantée. J'ai fait pour le multiplicateur un cadre de laiton, représenté dans la figure 452 par une vue en dessus et par une coupe; la partie extérieure sur laquelle s'enroule le fil a 200 millimètres de longueur dans sa partie droite, et les extrémités courbes sont des cercles de 15 millimètres de rayon; en sorte qu'un tour de fil correspond à une longueur à très peu près de 500 millimètres.

Le fil de 20 mètres fait 20 tours sur le cadre et il agit sur une aiguille de 1 décimètre qui est représentée dans la figure 452 entre les deux vues du cadre ; elle est munie à chaque bout d'un index léger sur lequel on trace des repères ; lorsqu'elle est posée sur son pivot comme on le voit dans la coupe, il est facile de la ramener exactement au même point. Le cadre est établi sur l'alidade mobile d'un cercle divisé de manière à composer une *boussole de sinus*. L'appareil étant au zéro on met la soudure froide à 0° et la soudure chaude à 100°, puis l'on observe la déviation correspondante : à Paris, cette déviation est de 20°, 15; et, dans les différens lieux de la terre, ou dans le même lieu à différentes époques, les intensités du magnétisme terrestre seront entre elles en raison inverse du sinus de la déviation.

Cet appareil me paraît être le plus simple et le plus exact pour déterminer avec certitude l'intensité magnétique de la terre.

290. *Diverses sources thermo-électriques*. La force électro-magnétique qui se développe au contact de deux métaux quelconques n'a pas encore été étudiée avec tout le soin qu'elle mérite ; ainsi, nous venons de voir qu'au contact du platine et du fer cette force est variable avec la température, et qu'elle a un minimum d'intensité moyenne qui correspond à la température du rouge naissant ; d'autres expériences m'ont fait voir qu'au contact du bismuth et du cuivre cette force est parfaitement constante, c'est-à-dire proportionnelle

à la température depuis 100 degrés *au dessus de zéro* jusqu'à 78° *au dessous de zéro*, qui est la température d'un mélange d'éther et d'acide carbonique solide, température que j'ai déterminée simultanément par le pyromètre à air, par le pyromètre bismuth et cuivre, et par le thermomètre à alcool. (*Comptes-Rendus de l'Acad. des Sciences*, avril 1837, t. 4, p. 514.) M. Becquerel s'est livré aussi à un grand nombre d'expériences sur ce sujet (t. 2. p. 46 et suiv.) : mais il reste encore beaucoup de recherches à faire pour déterminer avec précision les variations que la force électro-magnétique éprouve dans son intensité à diverses températures pour des métaux donnés, et surtout à comparer entre elles les intensités des courans qui sont produits par les diverses sources thermo-électriques.

291. *Piles thermo-électriques.* Pour étudier les lois du développement de l'électricité dans les piles thermo-électriqués, j'ai composé des piles de huit, de vingt-quatre et de trente-deux élémens, bismuth et cuivre : deux de ces élémens sont représentés dans la figure 457; la figure 458 représente une vue en dessus et une vue perspective de la pile de huit élémens ; des vases de terre, alternativement remplis de glace et d'eau chaude, servent à maintenir les soudures froides à 0 et les soudures chaudes à 60 ou 80°. Une petite aiguille aimantée suspendue à un fil de soie se dispose au dessus du milieu d'un élément cuivre, et marque par ses oscillations l'intensité du courant qui passe dans la pile.

Il est facile par ce moyen de constater avec une grande exactitude ce résultat général qui avait déjà été indiqué par MM. Œrsted et Fourier, savoir, que l'intensité du courant est proportionnelle au nombre des élémens qui sont en activité ; mais l'on démontre de plus que, quel que soit le nombre des élémens d'une pile, quand ils sont *tous* mis en activité, l'intensité absolue du courant est exactement la même. Ainsi, le courant de la pile de trente-deux élémens a exactement la même intensité que le courant de la pile de vingt-quatre, et

que le courant de la pile de huit, lorsque les différences de température sont égales, et l'on peut ajouter qu'il a la même intensité que le courant produit par une seule paire pour une même différence de température. Il en résulte que si l'on ne met en activité qu'une seule paire de la pile de trente-deux élémens, le courant n'est que la seizième partie de celui qui est produit par une seule paire ou par deux élémens : ce qui est une nouvelle confirmation de notre loi fondamentale, que l'intensité est en raison inverse de la longueur du circuit.

Voici encore un fait important que j'ai eu occasion d'observer, et dont la théorie des courans dérivés donne en même temps l'explication et la mesure.

Si dans la pile de 8 élémens (*fig.* 458) on chauffe seulement les deux soudures 1 et 4 au même degré, toutes les autres soudures étant à 0, on n'observe aucune apparence de courant dans la pile, ce qui doit être puisque les soudures ne peuvent donner naissance qu'à des courans égaux et contraires ; mais si l'on établit alors une communication *vv'* entre les deux élémens cuivre *cd* et *ef*, à l'instant cette traverse donne passage à un courant très intense. Il en résulte cette conséquence remarquable, que les courans contraires résultant de l'élévation de température des deux soudures 1 et 4 ne se détruisent pas, mais que chacun d'eux circule comme s'il était seul. Pour mettre cette vérité hors de doute, il suffit d'observer l'intensité du courant *vv'* et de montrer, comme je l'ai fait, que cette intensité est précisément celle qui résulte de l'ensemble des courans dérivés contraires et inégaux qui doivent passer par la jonction *vv'*.

Ainsi les courans opposés ne se détruisent pas, ou plutôt ils ne réduisent pas les fluides électriques à l'état d'équilibre et de repos, mais chacun d'eux produit les mouvemens propres qu'il produirait s'il était seul.

Les piles dont nous venons de parler ont été disposées dans le but de rechercher les lois fondamentales des courans; mais à raison de leur masse et de leur volume elles ne peuvent

pas servir aux observations thermométriques. Parmi les piles qui ont été construites dans ce but particulier, celle de Nobili est sans contredit la plus ingénieuse et la plus sensible ; elle est représentée dans la figure 459. Cette pile se compose de 25 ou 30 aiguilles de bismuth et d'antimoine, très déliées, ayant environ 4 ou 5 centimètres de longueur, elles sont soudées comme le représente la figure 460, de manière que toutes les soudures paires soient à un bout et toutes les soudures impaires à l'autre bout; l'ensemble forme un petit faisceau compacte et solide à cause des substances isolantes qui séparent les aiguilles l'une de l'autre, car il ne faut pas qu'elles se touchent ailleurs qu'aux soudures ; enfin, les deux *demi-élémens* qui terminent la chaîne viennent communiquer l'un à la cheville x et l'autre à la cheville y qui forment ainsi les deux pôles de la pile.

Deux fils roulés en hélice lâche et couverts de soie établissent la communication entre les pôles de la pile et le multiplicateur.

Si l'on connaissait avec exactitude la conductibilité du bismuth et de l'antimoine, et la dimension des élémens de la pile, on pourrait aisément calculer la longueur d'un fil de cuivre d'épaisseur donnée qui représente le circuit de la pile, et conclure de là le nombre des tours qu'il est nécessaire de donner au multiplicateur pour avoir la plus grande sensibilité possible. A défaut de cette méthode directe, on pourrait employer une méthode indirecte en ajoutant successivement au circuit de la pile deux longueurs différentes du même fil de cuivre, et, en observant les intensités correspondantes, on en déduirait aisément que le circuit de la pile diminue l'intensité du courant autant que le ferait une longueur déterminée de ce fil. Mais de simples tâtonnemens ont conduit à la construction d'un multiplicateur qui remplit le but avec une sensibilité suffisante. Nous verrons à l'article de la chaleur rayonnante les belles recherches qui ont été faites par M. Melloni

au moyen de cet appareil, auquel il a donné le nom de thermo-multiplicateur.

Courans hydro-électriques.

292. *Boussole de sinus* et *boussole de tangentes*. Les lois des courans hydro-électriques ne sont ni moins simples ni moins générales que celle des courans thermo-électriques; mais, pour les établir sur des mesures d'intensités suffisamment précises, nous avons dû avoir recours à des instrumens particuliers que nous avons nommés *Boussole de sinus* et *Boussole de tangentes*; nous donnerons d'abord une idée de ces instrumens.

Boussole de sinus. Nous avons indiqué précédemment (288) le principe sur lequel repose la boussole de sinus, nous ajouterons seulement que nous avons dû faire usage de plusieurs appareils de cette espèce ayant des sensibilités différentes; pour augmenter la sensibilité, il suffit de rapprocher de l'aiguille le circuit qui doit agir sur elle; pour la diminuer, au contraire, il suffit de l'éloigner; enfin, le circuit peut être simple et ne faire qu'un tour, comme il peut être multiple et représenter un véritable multiplicateur.

La figure 461 représente une boussole simple.

La figure 462 représente une boussole dont le circuit peut être à volonté simple ou multiple, car le cercle à gorge *abcd* est dégagé à sa partie inférieure *d* (*fig.* 462 *bis*), pour que l'on puisse passer aisément le fil qui porte le courant et augmenter ou diminuer à volonté le nombre des tours par lesquels il agit sur l'aiguille. Le diamètre du cercle est $\frac{1}{3}$ de mètre, en sorte que chaque tour du fil est d'un mètre.

J'ai employé d'autres boussoles de sensibilités différentes. La figure 465 représente celle de moyenne grandeur, elle peut aussi être simple ou à multiplicateur ; le diamètre de son cercle est de 22 centimètres. Nous verrons plus loin comment les sensibilités de ces diverses boussoles peuvent

être exactement comparées; elles sont, comme nous l'avons déjà dit, indépendantes de l'état magnétique de l'aiguille, pourvu que l'aiguille ait une force directrice suffisante.

Boussole de tangentes. La boussole de tangentes est représentée dans la fig. 464, elle se compose d'un grand cercle de 4 à 5 décimètres de diamètre qui est le cercle du courant; il est formé par un ruban de cuivre de 20 millimètres de largeur et de 2 millimètres d'épaisseur ; ce ruban est revêtu de soie, et ses deux extrémités, repliées très près l'une de l'autre pour se prolonger en dehors dans le sens du rayon, s'écartent ensuite pour plonger chacune dans un godet contenant du mercure. Le cercle du courant est disposé verticalement sur une espèce de banc qui est fendu au milieu de sa largeur pour le recevoir, et sur ce banc est établi un cercle divisé horizontal que doit parcourir une aiguille de boussole suspendue par un fil de soie dans l'intérieur d'une cloche de verre qui repose aussi sur le banc lui-même : toutes ces pièces sont disposées pour que le centre de l'aiguille soit autant que possible au centre du cercle du courant, et par conséquent pour que la direction de l'aiguille coïncide avec le plan vertical du cercle lorsque celui-ci est dirigé exactement dans le plan du méridien magnétique.

Les choses étant dans cet état, il est évident que, si l'on fait plonger les deux pôles d'une pile dans les godets pleins de mercure qui reçoivent déjà le pied du cercle, le courant passera dans le cercle et agira sur l'aiguille aimantée pour dévier le pôle austral à l'est ou à l'ouest; il est pareillement évident qu'il y aura un rapport déterminé entre la force du courant et l'angle de déviation de l'aiguille. Or, il est facile de voir que, si la longueur de l'aiguille est petite par rapport au rayon du cercle, l'intensité du courant sera mesurée par la tangente de la déviation : c'est pour cela que l'appareil peut être appelé *boussole des tangentes.* Cependant, s'il faut que l'aiguille soit courte sous ce rapport, il importe aussi qu'elle soit assez longue pour que l'on puisse aisément estimer un

quart ou même un cinquième, ou un sixième de degré. Pour remplir cette double condition, l'on a fixé l'aiguille aimantée bien perpendiculairement sur une longue aiguille de cuivre très légère dont les extrémités viennent courir sur les divisions du cercle divisé. Il faut que l'appareil soit parfaitement réglé, et pour cela il suffit d'examiner si les déviations des deux extrémités de l'aiguille de cuivre sont toujours égales entre elles, et si en faisant passer le courant dans un sens on obtient toujours le même résultat qu'en le faisant passer dans l'autre sens. Lorsque les angles atteignent 75 ou 80 degrés, une erreur de 10 minutes sur la lecture correspondrait à une différence d'intensité trop considérable pour que l'on pût la négliger : ainsi l'on ne peut regarder comme exactes que les indications qui sont inférieures à 75 ou 80°; mais, comme il est possible d'estimer moins de $\frac{1}{2}$ degré, on voit que la boussole des tangentes peut servir à comparer des courans dont l'un est environ trois cents fois plus fort que l'autre.

293. *Lois de l'intensité du courant produit par un élément.* Nous avons décrit précédemment l'élément hydro-électrique que nous avons employé dans ces recherches, et qui est représenté dans la figure 466; il a été préféré parce qu'il est le seul qui possède une force constante, et qui permette par conséquent d'établir les lois sur des données précises. Le courant de l'élément arrive à la boussole par deux fortes tiges de cuivre *c* et *d* (*fig.* 464), ayant environ 1 centimètre de diamètre et un demi-mètre de longueur.

Pour déterminer la loi suivant laquelle diminue l'intensité à mesure qu'on augmente la longueur du circuit, on fait, avec un *même* fil, des séries de longueurs différentes, par exemple, 5^m, 10^m, 40^m, 70^m, et 100 mètres; lorsque ces fils sont couverts de soie, on les enroule en couronne (*figure* 463) et on les enveloppe d'un ruban, de manière que les deux extrémités *a* et *b*, recourbées en crochets, puissent aisément plonger dans les godets de mercure. Il n'est pas inutile de les amalgamer d'avance.

On procède ensuite de la manière suivante :

On fait passer le courant directement dans la boussole, et l'on observe la déviation, puis l'on introduit successivement dans le circuit tous les fils de la série, en notant soigneusement les déviations correspondantes.

Voici, par exemple, le résultat d'une observation :

longueur ajoutée au circuit.	déviation observée.	tangente de la déviation.
0 mètr.	62° 00′	1,880
5	40 20	0,849
10	28 30	0,543
40	9 45	0,172
70	6 00	0,105
100	4 15	0,074

On n'observe d'abord aucune espèce de régularité dans la marche décroissante que prennent les intensités à mesure que la longueur du fil augmente ; mais, si l'on réfléchit que le fil ajouté au circuit primitif n'est pas le seul obstacle que le courant ait à vaincre, et qu'il faut compter aussi pour quelque chose le liquide de l'élément lui-même, le cercle de la boussole et les différens conducteurs qui servent à compléter les communications, l'on sera conduit à supposer que l'ensemble de ces résistances diverses, que j'appelle *résistance de l'élément*, peut être représenté par une certaine longueur inconnue x du fil lui-même, qui a été ajouté au circuit, en sorte qu'en réalité les longueurs du circuit, les déviations et les tangentes ou les intensités observées donnent le tableau suivant :

longueur du circuit.	déviations observées.	tangentes des déviations.
x	62, 00	1,880
$x+5$	40, 20	0,849
$x+10$	28, 30	0,543
$x+40$	9, 45	0,172
$x+76$	6, 00	0,105
$x+100$	4, 15	0,074

S'il est vrai, maintenant, que les intensités des courans hydro-électriques soient en raison inverse des longueurs du circuit comme les intensités des courans thermo-électriques, il sera facile de tirer de ces résultats la valeur de x, qui alors devra être constante. Or, en comparant d'après ce principe la première observation avec chacune des suivantes, on en tire en effet des valeurs de x très peu différentes l'une de l'autre; ces valeurs sont : 4^m, 11; 4,06; 4,03; 4,14; 4,09; dont la moyenne est 4,08.

Ainsi, la résistance de l'élément est exprimée par 4^m,08 du fil de cuivre dont les longueurs différentes ont été ajoutées au circuit. En adoptant cette longueur et la loi générale des intensités en raison inverse de la longueur totale du circuit, l'on peut aisément calculer les déviations qui auraient dû être obtenues, et les comparer à celles que l'observation directe a données.

Voici le tableau des résultats :

longueurs du circuit.	déviations calculées.	déviations observées.	différence.
m	°	°	
4,08	62,00′	62,00′	
9,08	40,18	4,200	+ 2′
14,08	28,41	28,30	— 11
44,08	9,56	9,45	— 11
74,08	5,57	6,00	+ 3
104,08	4,14	4,15	+ 1

Une telle coïncidence entre les résultats directs de l'observation et ceux qui se déduisent de la loi générale appliquée aux courans hydro-électriques ne peut laisser de doute sur l'exactitude de cette loi.

Je ne cite ici qu'un exemple pour donner une idée de la méthode d'observation, mais je dois ajouter que les expériences ont été variées autant que pouvait l'exiger l'importance du sujet, que de nombreuses séries ont été faites avec des élémens très énergiques ou très affaiblis, et avec des fils très bons et très mauvais conducteurs, comme l'or, l'argent, le platine, le laiton et le fer. J'ajouterai seulement que les fils de fer ou de laiton, quoique pris bout à bout dans la même pièce, n'ont pas toujours une conductibilité constante, et que tous les résultats n'offrent pas une concordance aussi parfaite que ceux que nous venons de rapporter; mais, lorsqu'on prend la peine d'observer directement la conductibilité et d'en tenir compte, toutes les petites irrégularités disparaissent.

Lorsque la résistance d'un élément est une fois déterminée au moyen d'un fil dont on connaît la section et la conductibilité, il est facile de trouver le nombre qui doit l'exprimer lorsqu'on emploie aux expériences un autre fil quelconque : cette résistance, par exemple, qui est 4,08 pour le fil de l'expérience précédente, serait 408^m pour un fil de même diamètre dont la conductibilité serait 100 fois plus grande, etc., etc. On peut même, comme je l'avais fait autrefois, employer ce moyen pour déterminer la conductibilité relative des différens métaux; mais les élémens ordinaires à la Wollaston ou en hélice, que j'employais alors, éprouvent de telles variations d'intensité, qu'il est impossible en les employant de démontrer la loi dont il s'agit avec une précision suffisante.

Il résulte enfin de ces observations que, pour les sources hydro-électriques comme pour les sources thermo-électriques, l'intensité du courant est en raison directe de la section

et de la conductibilité, et en raison inverse de la longueur totale ; mais cette longueur totale n'est point la longueur apparente : c'est la longueur de toutes les diverses parties du courant, réduites à une même section et à une même conductibilité par les principes que nous avons développés (285).

294. *Courans dérivés.* Les formules des courans dérivés que nous avons établies précédemment (286) s'appliquent sans aucune restriction aux courans hydro-électriques, lorsqu'on a déterminé, comme nous venons de le faire, la résistance de la source qui donne naissance au courant ; seulement, il faut avoir soin d'exprimer la longueur totale du circuit en y faisant entrer cette résistance avec la valeur numérique qu'elle doit avoir d'après la section et la conductibilité que l'on choisit, pour exprimer les longueurs de toutes les autres parties du circuit.

Les résultats de ces formules sont ici beaucoup plus faciles à vérifier, parce que les courans ont une intensité beaucoup plus grande ; les appareils dont je me suis servi pour ces vérifications sont des boussoles de sinus analogues à celles qui sont représentées dans les figures 461 et 465, mais ayant des sensibilités différentes, suivant les intensités qu'il s'agissait d'observer.

295. *Lois de l'intensité des courans produits par une pile.* Les piles qui m'ont servi dans ces recherches ont été composées avec des élémens analogues à celui qui est représenté dans la figure 466 ; on les a disposés d'une manière convenable pour observer chacun d'eux séparément : nous citerons ici une seule série d'expériences faites avec une pile de 6 élémens pour indiquer la marche qui a été suivie.

On a déterminé d'abord l'intensité individuelle et la résistance de chaque élément.

Voici le tableau des résultats.

NUMÉROS des élémens.	LONGUEURS ajoutées à L'ÉLÉMENT.	DÉVIATIONS observées.	TANGENTES ou intensités.	RÉSISTANCES
1	0 mèt.	69° »′	2, 600	»m »
	5	43 20	0, 943	2, 85
	10	30 »	0, 577	2, 85
	40	11 »	0, 194	3, 20
			Moyenne...	2, 97
2	0	66 30	2, 300	», »
	5	43 »	0, 933	3, 41
	10	29 40	0, 570	3, 35
	40	10 40	0, 188	3, 55
			Moyenne...	3, 44
3	0	67 40	2, 434	», »
	5	42 30	0, 916	3, 02
	10	29 40	0, 570	3, 05
	40	10 20	0, 182	3, 23
			Moyenne...	3, 10
4	0	67 »	2, 355	», »
	5	42 30	0, 909	3, 19
	10	29 40	0, 570	3, 19
	40	10 20	0, 182	3, 35
			Moyenne...	3, 25
5	0	68 »	2, 475	», »
	5	43 20	0, 943	3, 08
	10	30 30	0, 589	3, 13
	40	11 »	0, 194	3, 40
			Moyenne...	3, 21
6	0	64 »	2, 050	», »
	5	41 »	0, 869	3, 68
	10	28 40	0, 548	3, 64
	40	10 »	0, 176	3, 75
			Moyenne...	3, 69

Ainsi, ces élémens avaient à peu près la même force : à l'exception cependant du 6e, qui était un peu plus faible.

Les communications ayant été établies entre tous les élé-

mens, on a eu une pile dont l'intensité était telle qu'elle pouvait porter au rouge un fil de platine de 1/4 de millimètre de diamètre et de plus de 20 centimètres de longueur.

On a fait ensuite passer par la boussole des tangentes le courant qu'elle pouvait produire, et l'on a obtenu les résultats suivans avec le fil de cuivre des expériences précédentes:

LONGUEURS ajoutées.	DÉVIATIONS observées.	TANGENTES des déviations.	RÉSISTANCES.
0 mètr.	68° 30′	2, 538	», »
5	63 20	1, 991	18, 20
10	58 30	1, 632	19, 03
40	39 »	0, 810	18, 01
70	28 »	0, 532	18, 56
100	21 30	0, 394	18, 38
		Moyenne.....	18 43

Ces résultats remarquables prouvent d'abord que l'intensité du courant produit par une pile de six élémens est moindre en apparence que l'intensité du courant produit par l'élément le plus fort, car l'élément n° 1 avait donné une déviation de 69° et la pile entière ne donne qu'une déviation de 68° 30′.

Ces résultats font voir ensuite que la résistance d'une pile est beaucoup plus grande que celle de chacun de ses élémens, mais que son intensité reste soumise à la loi générale, c'est-à-dire qu'elle est, comme pour un simple élément, en raison inverse de la longueur totale du circuit.

Mais il reste à trouver le rapport qui ne peut manquer d'exister entre l'intensité de la pile et celle de ses divers élémens constitutifs. Pour cela, nous remarquerons d'abord que si l'on ajoute bout à bout divers élémens pour en composer

une pile, le courant de l'élément n° 1 n'a plus à traverser seulement la longueur de son circuit et celle de la boussole, mais qu'il doit traverser en outre tous les autres élémens, et par conséquent s'affaiblir proportionnellement à la longueur qui représente la résistance de ces élémens; qu'il en est de même de l'élément n° 2, et de tous les autres.

Par conséquent, si l'on représente par

t_1 et r_1 l'intensité et la résistance individuelle du 1er élément,
t_2 et r_2..... du 2e élément,
t_3 et r_3..... du 3e élément,
etc., etc., etc.

ces résistances étant déterminées comme il a été dit précédemment, il est clair que le courant de l'élément n° 1, lorsqu'il entre dans la pile, aura à traverser sa propre longueur r_1, puis la longueur $r_2 - a$, en représentant par a la longueur de la boussole et des conducteurs communs, qui doit se retrancher de la longueur r_2; puis il aura à traverser ensuite la longueur $r_3 - a$ du 3e élément, la longueur $r_4 - a$ du 4e élément, et enfin la longueur l du circuit ajouté; en sorte qu'en dernier résultat, le courant de l'élément n° 1 aura à traverser une longueur exprimée par

$$r_1 + r_2 + r_3 + \ldots . r_n - a\,(n-1) + l,$$

ou par

$$\Sigma r - a\,(n-1) + l$$

en désignant par $\Sigma\, r$ la somme des quantités semblables, $r_1 + r_2 + \ldots r_n$.

Or, si pour une longueur r_1 son intensité est t_1, il est évident que, pour une longueur $\Sigma\, r - a\,(n-1) + l$, son intensité sera :

$$\frac{r_1\, t_1}{\Sigma r - a\,(n-1) + l}.$$

Par la même raison, l'intensité du deuxième élément sera

exprimée par

$$\frac{r_2\, t_2}{\Sigma r - a\,(n-1) + l},$$

celle du 3e par

$$\frac{r_3\, t_3}{\Sigma r - a\,(n-1) + l};$$

en sorte que la somme des intensités de tous les élémens de la pile sera, en dernier résultat, exprimée par

$$\frac{\Sigma r\, t}{\Sigma r - a\,(n-1) + l},$$

en désignant par $\Sigma r t$ la somme des produits semblables $r_1\ t_1 + r_2\, t_2\ +$ etc., etc.

Telle est donc la formule générale qui exprime l'intensité d'une pile au moyen des intensités individuelles de ses élémens.

Pour en faire l'application à l'expérience précédente, il suffit de connaître la valeur de a; car on a, dans le premier tableau, les six valeurs de r et de t pour chaque élément, et, dans le second, les différentes valeurs de l. Les dimensions connues du ruban de cuivre et des deux grosses tiges de cuivre qui servent à la communication permettent de conclure que a est à peu près égal à $0^m,26$, en l'exprimant en longueur de même espèce que le fil qui a servi à déterminer la résistance; ainsi $(n-1)\ a = 5\,.\,0^m,26 = 1^m,30$.

On voit d'ailleurs, par le premier tableau, que la somme des résistances individuelles observées est 19,66 ; ainsi

$$\Sigma r - a\,(n-1) = 19,66 - 1,30 = 18,36.$$

On voit par les valeurs de r_1 et de t_1, de r_2 et t_2 etc., consignées dans le même tableau, que $\Sigma r t$ est égal à 46,343.

Par conséquent, l'intensité de la pile est exprimée par:

$$\frac{46.343}{18,36 + l}.$$

Or, en calculant ces intensités, pour $l=o$, $l=5$, $l=10$, $l=40$, $l=70$, $l=100$, et en comparant ces résultats calculés aux résultats observés, après être remonté des tangentes aux angles, on obtient le tableau suivant :

longueurs ajoutées.	déviations observées.	déviations calculées.	différences.
0	68,30	68,23′	+ 7′
5	63,20	63,15	+ 5
10	58,30	58,33	— 3
40	39	38,30	+ 30
70	28	27,42	+ 18
100	21,30	21,25	+ 5

Si l'on se reporte maintenant à toutes les expériences individuelles dont les élémens sont entrés dans ce calcul définitif, on ne se refusera pas sans doute à admettre comme complètement satisfaisant cet accord du calcul et de l'expérience, et, par conséquent, à regarder comme rigoureusement démontrés les principes d'après lesquels on a pu parvenir à exprimer par une formule générale l'intensité d'une pile au moyen des intensités individuelles de ses élémens. Au reste, ce n'est qu'après avoir fait un grand nombre d'autres séries d'expériences, toutes également concluantes, que la formule générale a pu nous inspirer une entière confiance.

Nous ajouterons seulement qu'il ne faut jamais employer des fils qui puissent s'échauffer d'une manière trop sensible par l'effet du courant de la pile, parce que leur conductibilité étant altérée par le changement de température, ils doivent être alors assimilés à des fils de substances différentes, et leurs longueurs réelles ne sont plus représentées par leurs longueurs apparentes.

Il est, au reste, bien entendu que, pour les piles comme pour les élémens, les intensités observées ne sont en raison inverse des longueurs des circuits que quand ces circuits sont composés de fils homogènes de même section et de

même conductibilité : dans le cas contraire, il faut, comme nous l'avons indiqué, prendre les *longueurs réduites*, c'est-à-dire ramenées par le calcul à une même section et à une même conductibilité.

Nous pouvons reprendre maintenant la formule générale précédente pour indiquer rapidement quelques unes des nombreuses conséquences qui peuvent s'en déduire.

Première conséquence. Puisque l'intensité d'une pile est représentée en général par

$$\frac{\Sigma r\, t}{\Sigma r - a(n-1) + l},$$

il en résulte qu'elle est toujours en raison inverse de la longueur du circuit, comme nous l'avons reconnu par l'expérience; et il en résulte, de plus, qu'il est toujours possible de concevoir un seul élément doué de telles propriétés qu'il reproduise exactement à lui seul tous les phénomènes de la pile.

En effet, soit R la résistance d'un tel élément et T son intensité lorsque son courant ne traverse que son propre circuit R ; lorsque son courant traversera en outre la longueur l du fil ou du conducteur qui a servi à exprimer la résistance, son intensité sera exprimée par

$$\frac{RT}{R+l}$$

et si cet élément peut produire tous les phénomènes de la pile, il faudra que l'équation

$$\frac{\Sigma rt}{\Sigma r - a(n-1) + l} = \frac{RT}{R+l}$$

puisse toujours se vérifier indépendamment de la valeur de l; et c'est la seule condition qui doive être remplie : or, cette condition se remplit par les deux relations

$$R = \Sigma r - a(n-1),$$

et. . . . . $$T = \frac{\Sigma rt}{\Sigma r - a(n-1)}.$$

Si l'on pouvait donc, au moyen de quelque réaction chimique ou de toute autre cause capable de développer de l'électricité, parvenir à composer un élément dont la résistance propre fût égale à $\Sigma r - a(n-1)$, cet élément pourrait produire tous les effets de la pile; car, en augmentant les surfaces ou en employant quelque autre moyen, on arriverait sans doute à lui donner une tension telle qu'elle pût satisfaire à l'autre relation

$$T = \frac{\Sigma rt}{\Sigma r - a(n-1)}.$$

Alors, dans tous les cas, cet élément se conduirait comme une pile et produirait partout les mêmes effets.

Deuxième conséquence. Si tous les élémens ont la même force, la formule générale devient :

$$\frac{nrt}{nr - a(n-1) + l};$$

Si a est très petit par rapport à r (et l'on peut toujours disposer les appareils pour qu'il en soit fait ainsi), la formule se simplifie encore et devient:

$$\frac{nrt}{nr + l};$$

Enfin, si l'on fait $l = pr$, c'est-à-dire si le conducteur traversé par le courant est exprimé par p fois la résistance d'un élément, l'intensité de la pile se réduit à :

$$\frac{nt}{n+p}.$$

Par conséquent, si p est petit par rapport à n, ce qui arrive

dans une pile d'un grand nombre d'élémens dont le courant traverse des conducteurs d'une grande section et d'une grande conductibilité, l'intensité se réduit à :

$$\frac{nt}{n} = t;$$

c'est-à-dire que, dans ce cas, l'intensité de la pile n'est pas plus grande que celle d'un seul élément.

Au contraire, si p est très grand par rapport à n, ce qui arrive quand le courant de la pile doit traverser quelques liquides ou seulement de très grandes longueurs d'un fil délié ou mauvais conducteur, et lorsqu'en même temps la valeur de r est petite, c'est-à-dire lorsque le liquide de la pile est très bon conducteur, alors l'intensité est exprimée par

$$\frac{nt}{p},$$

c'est-à-dire qu'elle est proportionnelle au nombre des élémens.

Ces deux cas extrêmes sont les deux limites entre lesquelles l'intensité d'une pile quelconque est essentiellement renfermée. Ainsi, dans le cas le plus défavorable, l'intensité de la pile n'est ni plus ni moins grande que celle d'un élément ; dans le cas le plus favorable elle est proportionnelle au nombre des élémens; enfin, dans les cas ordinaires, elle a une valeur intermédiaire et comprise entre ces limites.

La tension du courant n'est donc, en dernier résultat, que la faculté de traverser un *long circuit* sans diminuer trop rapidement d'intensité ; et, quand nous parlons d'un long circuit, il faut, comme toujours, entendre la longueur réelle et non la longueur apparente. S'il s'agit, par exemple, d'un circuit d'eau acidulée de quelques millimètres de longueur, il faut bien comprendre que ce circuit exprimé en longueur de fil, vaudra peut-être quelques millions de mètres, suivant la conductibilité et la section du fil que l'on aura choisi pour exprimer les résistances des élémens.

296. *Loi de l'intensité d'un courant produit par plusieurs élémens réunis pôle à pôle.* Lorsqu'on réunit deux élémens pôle à pôle pour faire ensuite passer le courant qui en résulte dans un circuit quelconque, il est facile de déterminer par les mêmes principes l'intensité du courant lorsqu'on connaît l'intensité et les résistances individuelles des élémens : il suffit pour cela de remarquer qu'en considérant le premier élément comme seul actif, le deuxième élément donne passage à un courant dérivé dont on peut trouver l'intensité ; ensuite, en considérant à son tour le deuxième élément comme seul actif, le premier élément donne passage alors à un courant dérivé dont l'intensité peut aussi être calculée. Ces calculs n'ont rien de difficile, d'après ce que nous avons dit précédemment, mais ils sont trop longs pour que nous puissions les indiquer ici ; nous donnerons seulement la formule générale qui en résulte et qui représente l'intensité d'une pile de cette espèce composée de n élémens dont les intensités et les résistances sont exprimées par t_1, r_1, t_2, r_2 ; etc. Cette formule est la suivante :

$$\frac{r_1\, r_2 \ldots r_n\,(t_1 + t_2 + \ldots t_n)}{r_1\, r_2 \ldots r^n + a\,(r_2\, r_3 \ldots r_n + r_1\, r_3 \ldots r_n + \text{etc. } r_1\, r_2 \ldots r_{n-1})}.$$

a représente la longueur du fil ajouté au circuit, et toutes les résistances doivent être exprimées en longueur de ce fil.

Lorsque tous les élémens sont égaux, et pour leur résistance et pour leur intensité, cette formule devient :

$$\frac{rnt}{r + na};$$

et, si l'on suppose que la longueur additionnelle a soit représentée par pr, on a enfin ;

$$\frac{nt}{1 + np}.$$

Or, un seul élément pour la même longueur additionnelle

pr, aurait une intensité exprimée par :

$$\frac{t}{1+p};$$

d'où il résulte qu'entre une pile de n élémens et un seul élément de même force, il y a un rapport d'intensité qui est exprimé par :

$$\frac{n+np}{1+np}.$$

Ainsi, quand l'on n'ajoute rien au circuit, p étant égal à 0, ce rapport est égal à n, c'est-à-dire que l'intensité du courant de la pile est proportionnelle au nombre des élémens t : au contraire, quand p est très grand, le rapport se réduit à l'unité, c'est-à-dire que l'intensité du courant de la pile est, alors seulement, égale à celle de l'un des élémens.

Ce résultat explique pourquoi les piles à grande surface et à petite tension ne peuvent, en général, produire aucune action chimique : car, aussitôt que le courant doit passer par un mauvais conducteur qui est, par conséquent, exprimé par une très grande longueur de fil, la réunion pôle à pôle de plusieurs élémens, ne peut, à cause des dérivations, rien donner de plus qu'un seul élément.

Tous les phénomènes extrêmement variés que présentent ces systèmes de piles ont été vérifiés par des expériences analogues aux précédentes.

Comparaison des différentes sources électriques et détermination de la quantité d'électricité qui est nécessaire pour décomposer un gramme d'eau.

297. *Rapport de conductibilité des liquides et des métaux.* Pour arriver à la comparaison des différentes sources electriques, il est nécessaire de donner d'abord une idée de la conductibilité relative des liquides et des métaux. Or, il arrive pour les liquides comme pour les métaux que l'inten-

sité du courant est en raison directe de la section, et en raison inverse de la longueur.

Cette proposition fondamentale se démontre de la manière suivante :

On dispose différens systèmes de tubes analogues à celui qui est représenté dans la figure 467, les deux tubes d'un même système étant toujours égaux et bien cylindriques; on les remplit d'un liquide et l'on fait passer un courant sur la boussole de sinus (*fig.* 462) et par les tubes, en établissant successivement les communications de trois manières différentes, pour avoir à la boussole trois déviations différentes.

Dans la première expérience, le courant ne passe que par l'un des tubes et traverse ainsi une colonne liquide de longueur 1 et de section 1;

Dans la deuxième expérience, le courant passe par les deux tubes à la fois et traverse une colonne de longueur 1 et de section 2;

Dans la troisième expérience, le courant passe par l'un des tubes, puis revient par l'autre, et traverse par conséquent une longueur 2 et une section 1.

En comparant les trois déviations qui en résultent, on voit qu'en effet l'intensité du courant est en raison directe de la section, et en raison inverse de la longueur.

Lorsqu'on opère avec des tubes très larges remplis de liquides bons conducteurs, il est nécessaire de tenir compte de la résistance de la pile et de la longueur du fil qui passe sur la boussole : mais, pour les tubes étroits et longs, remplis de liquides mauvais conducteurs, le fil et la résistance de la pile peuvent être négligés. Dans tous les cas, il faut, pour les expériences comparatives du même liquide, établir les communications en touchant le liquide avec le même métal, et choisir le métal pour qu'il n'éprouve pas une action chimique qui trouble les résultats; ainsi, en touchant de l'eau salée avec de l'argent, le chlorure d'argent qui se forme trouble d'un instant à l'autre tous les résultats.

Cette loi générale de l'intensité en raison directe de la section et en raison inverse de la longueur s'applique à toutes les colonnes liquides que j'ai eu occasion d'essayer, pourvu que leur longueur égale au moins cinq ou six fois leur diamètre.

Ce principe posé, la comparaison des conductibilités devient très facile, car il suffit de comparer un seul liquide à un métal et de faire ensuite la comparaison de ce liquide avec tous les autres :

Le liquide que j'ai choisi est une dissolution saturée de sulfate de cuivre à la température de 15°, et j'ai procédé de la manière suivante pour comparer sa conductibilité à celle du platine.

Sur une planche de 2 mètres de longueur et d'une largeur convenable on a planté à chaque bout une rangée de petites chevilles de bois de 2 centimètres de hauteur, de 5 millimètres de diamètre, et espacées d'un centimètre de centre en centre ; puis l'on a fait passer un fil de platine d'une cheville à sa correspondante de l'autre bout de la planche, jusqu'à ce que les 200 mètres de longueur de fil fussent ainsi étalés sans se toucher ; à chaque cheville d'une rangée correspondent ainsi 4 mètres de fil, ce qui donne 50 chevilles dans chaque rangée :à chac une le fil est arrêté par une goutte de cire à cacheter.

A côté de cet appareil on a disposé horizontalement un long tube cylindrique de 1 mètre de long et de 20 millimètres de diamètre, rempli de la dissolution de sulfate de cuivre ; puis l'on a fait passer le courant d'une pile sur une boussole et par la dissolution, en observant avec soin la déviation correspondante ; immédiatement après, on a fait passer le même courant par la même boussole et par une longueur convenable du fil de platine, de manière à obtenir la même déviation à la boussole, ce qui n'exige pas de longs tâtonnemens parce qu'on touche le fil de platine avec une pince de cuivre bien amalgamée que l'on fait passer d'un fil à l'autre ou que l'on promène sur le

même fil jusqu'à ce que la condition soit remplie : alors, il est évident que cette longueur du fil de platine qu'il faut introduire dans le circuit est équivalente à la colonne liquide ; par conséquent, la conductibilité du platine et celle du liquide sont entre elles comme le rapport direct des longueurs multiplié par le rapport inverse des sections.

La longueur du fil de platine est de 132 mètres, et son diamètre de $\frac{144}{1000}$ de millimètre.

La longueur de la colonne liquide est 1 mètre, et son diamètre de 20 millimètres.

D'où il est facile de conclure que la conductibilité du platine est : 2546680,
c'est-à-dire qu'elle est deux millions de fois et demie plus grande que celle du sulfate de cuivre.

La conductibilité du cuivre étant six fois et demie celle du platine, on voit qu'elle est seize millions de fois plus grande que celle de la dissolution ; et celle du palladium est environ trente millions de fois plus grande.

Pour comparer maintenant les autres liquides au sulfate de cuivre, j'emploie l'appareil qui est représenté dans la figure 468. Cet appareil est composé de trois tubes cylindriques de différens diamètres terminés en bas par des bouchons de cuivre, et recevant à leur partie supérieure un long fil de cuivre qui peut s'enfoncer plus ou moins dans les tubes, où se trouve la dissolution saturée de sulfate de cuivre. L'autre liquide est dans un tube horizontal pareillement cylindrique, et de dimensions convenables. L'on fait passer le courant par la boussole et par le liquide à essayer ; ensuite, on le fait passer par la boussole et par celui des tubes verticaux qui convient le mieux, en enfonçant le fil de cuivre jusqu'à ce qu'on arrive à obtenir la même déviation que dans l'expérience qui a été faite avec le liquide ; alors, il suffit de comparer les longueurs et les sections des colonnes soumises à l'épreuve.

Voici quelques résultats des expériences :

liquides.	conductibilité.
Dissolution de sulfate de cuivre saturée	1,0000
Id. étendue de 1 vol. d'eau	0,6400
Id. id. 2 vol. d'eau	0,4400
Id. id. 4 vol. d'eau	0,3100
Id. de zinc saturée	0,4170
Eau distillée	0,0025
Id. avec $\frac{1}{20000}$ d'acide nitrique	0,015

Pour le sulfate de zinc le contact du liquide a eu lieu avec du zinc, et pour l'eau avec du platine.

298. *Rapport d'intensité des courans thermo-électriques et hydro-électriques.* On avait pu supposer jusqu'à présent que les courans thermo-électriques et hydro-électriques avaient entre eux des différences essentielles, tenant à la nature même de leur origine; mais l'identité des lois auxquelles ils sont soumis peut faire présumer maintenant qu'en réalité ils ne diffèrent que par leur intensité.

Une méthode au moyen de laquelle on peut les comparer sous ce rapport n'est donc pas sans importance, et nous allons faire connaître, par un exemple, celle que nous avons employée.

Un courant thermo-électrique, produit par un élément bismuth et cuivre, donne à la boussole pyrométrique une déviation de 16°; la différence des températures des deux soudures est 100°, et la longueur *totale* du circuit est équivalente à 50 mètres d'un fil de cuivre ayant un millimètre de diamètre, et une conductibilité 6,5 par rapport au fil de platine de 200 mètres de l'expérience précédente.

Un courant hydro-électrique produit par une pile ordinaire de douze élémens, très-faible, donne à la même boussole une déviation pareille de 16°; mais, pour cela, il faut que la longueur *totale* du circuit soit de 180 mètres du fil de platine. Dans cette expérience, on varie à volonté la longueur du fil de platine, comme nous l'avons dit, afin d'avoir

la même déviation ; et il est bien entendu que, dans les 180 mètres, sont compris la résistance de la pile, la longueur réduite de la boussole et celle des autres conducteurs.

Ces deux courans ayant la même intensité, les sources qui les produisent sont entre elles comme les longueurs des circuits, ces longueurs étant exprimées par le même fil.

Or, le diamètre du cuivre étant 1^{mm}, et sa conductibilité 6, 5 ; et le diamètre du fil de platine étant $0^{mm},144$, et sa conductibilité 1,

Il est facile de voir que 1^{m} du fil de platine est équivalent à 313^{m} du fil de cuivre, et que 180^{m} équivalent par conséquent à 56340^{m}. Ainsi, le circuit thermo-électrique étant de 50^{m}, et le circuit hydro-électrique de 56340^{m} du même fil, la source hydro-électrique vaut 1127 fois la source thermo-électrique. La pile de 12 paires était, comme nous l'avons dit, extrêmement faible ; j'estime qu'on aurait pu la rendre 100 fois plus forte, et qu'une pile de 12 paires, très énergique, donne un courant dont l'intensité peut être 100,000 fois plus grande que celle d'un élément bismuth et cuivre ayant une différence de température de 100°, et par conséquent 10 millions de fois plus grande que celle du courant produit par un élément bismuth et cuivre dont les soudures n'ont que 1° de différence de température.

Il est facile de voir que cette méthode de comparaison peut être appliquée à une pile quelconque, et qu'il ne serait pas nécessaire d'employer un fil de platine plus long que celui qui nous a servi ; car on pourrait aisément atténuer le courant de la plus forte pile en lui faisant traverser des colonnes liquides de dimension et de conductibilité connues, qui seraient ensuite estimées en longueur de fil de platine.

299. *Définitions de l'intensité des courans, de la quantité d'électricité qui les constitue, et de la tension des sources électriques.* On peut appeler courans de même intensité ceux qui produisent la même déviation en agissant de la même manière sur la même aiguille aimantée : quand on dit, par

exemple, que toutes les parties d'un circuit ont la même intensité, on n'entend pas dire autre chose, sinon qu'en prenant des longueurs égales sur ces différentes parties, elles produisent des déviations égales sur une même aiguille, lorsqu'elles agissent sous le même angle et à la même distance, ou en général de la même manière. Or, dans nos boussoles de sinus, les intensités, définies de la sorte, étant proportionnelles aux sinus de la déviation, il est évident qu'un courant aura une intensité double ou triple de l'intensité d'un autre courant lorsqu'il produira des déviations dont les sinus seront doubles ou triples.

Quantités d'électricité. Il importe maintenant d'examiner les relations qui peuvent exister entre les intensités des courans et les quantités d'électricité en mouvement qui les constituent. Lorsque l'intensité d'un courant augmente, la quantité d'électricité qui est en circulation pour le constituer augmente-t-elle dans le même rapport ? Pour résoudre cette question, l'on peut admettre comme évident que la quantité d'électricité qui passe dans un circuit d'une intensité constante est proportionnelle au temps, c'est-à-dire que dans 2″ il en passe une fois autant que dans 1″, etc., etc. Il suffit donc d'examiner si, en réduisant à moitié le temps pendant lequel passe un courant, on réduit pareillement à moitié son action sur l'aiguille : car, s'il en est ainsi, il sera vrai de dire que la quantité d'électricité est proportionnelle à l'effet électro-magnétique du courant ou à son intensité.

Parmi les moyens qui se présentent pour réduire le temps de l'action d'un courant sur l'aiguille, sans cesser d'obtenir une déviation qui soit la même pendant l'action et pendant l'interruption, j'ai adopté le suivant :

J'ai fait construire différentes roues dentées métalliques analogues à celle qui est représentée dans la figure 469 ; les dents sont rectangulaires, et leur intervalle est rempli avec des dents de bois : cependant, la tranche de la roue se trouve unie comme le pourtour d'un disque et présente ainsi des

surfaces alternativement conductrices et non conductrices, les premières étant toutes égales entre elles, et les secondes pareillement égales entre elles; mais leur rapport étant variable d'une roue à l'autre.

Dans la figure 469 la dent de métal est égale à la dent de bois. Cette roue portée sur un axe métallique peut recevoir un mouvement de rotation extrêmement rapide; l'un des pôles de la pile communique avec l'axe, et l'autre à un fil plus ou moins long qui passe sur la boussole de la figure 462 et vient se terminer ensuite par une petite languette *l* dont l'extrémité presse un peu contre la tranche de la roue; cette languette est disposée pour n'éprouver aucune vibration sensible. Pendant le repos, lorsque la languette touche une dent de métal, le courant passe en totalité et l'on peut observer la déviation qu'il imprime à la boussole : au contraire, quand la languette touche une dent de bois, le courant ne passe plus et l'aiguille de la boussole revient au zéro. Quand le mouvement de la roue est très lent, l'aiguille oscille et ne s'arrête pas; mais, à mesure qu'il s'accélère, les oscillations diminuent d'amplitude, et l'on arrive bientôt à une certaine vitesse pour laquelle l'aiguille reste parfaitement fixe; à partir de ce point, on peut augmenter la vitesse indéfiniment sans que l'aiguille cesse d'être immobile et de marquer la même déviation.

Par exemple, dans une expérience, la déviation était 60° pendant le repos; la roue étant mise en mouvement, il a fallu faire environ cinq tours par *minute* pour que l'aiguille cessât d'osciller, elle marquait alors une déviation de 25° 45′; et, lorsque la vitesse a été portée à vingt tours par *seconde*, l'aiguille est restée immobile à 25° 45′; le sinus de 60° étant doublé du sinus de 25° 45′, il en résulte que, pendant le mouvement, l'intensité du courant a été réduite à moitié. Or, la roue portait cent vingt dents, soixante de bois et soixante de métal : lorsqu'elle faisait vingt tours par seconde, il passait deux mille quatre cents dents en 1″; il y avait donc douze

cents fois passage du courant pendant $\frac{1''}{2400}$ et douze cents fois interruption pendant le même temps. Si, pendant chaque contact, on pouvait ne laisser passer que la moitié du courant et retenir l'autre moitié pour la faire passer pendant l'intermittence, il est évident que l'on aurait un courant continu formé par une quantité d'électricité moitié moindre et marquant une déviation de 25° 45'. D'où il résulte enfin que la quantité d'électricité qui constitue le courant est proportionnelle à l'intensité de ce courant; aussi *les intensités* peuvent être prises pour *la mesure des quantités d'électricité.*

Ces expériences ont été faites avec des roues dans lesquelles les dents de bois et les dents de métal avaient d'autres rapports, et elles ont conduit au même résultat: il faut seulement avoir bien attention que les fils qui composent le circuit ne fassent pas de circonvolutions sur eux-mêmes, car, en vertu de la réaction dont nous avons parlé (277), on observe alors des résultats tout-à-fait différens; c'est même un très utile moyen d'étudier ces phénomènes singuliers de réaction et d'examiner les renversemens de courans qu'ils produisent quelquefois.

La proposition précédente nous conduit à cette conséquence, qu'une même source électrique peut, dans le même temps, donner des quantités d'électricité très différentes, et que ces quantités sont précisément en raison inverse des longueurs des circuits que traverse le courant, les longueurs étant rapportées à une même unité ou à un même fil. En effet, puisque l'intensité d'un courant est réduite à moitié lorsqu'on double la longueur totale du circuit, il est bien évident que la quantité d'électricité qui passe alors dans le même temps se trouve réduite à moitié, puisqu'elle est toujours proportionnelle à l'intensité du courant. Les sources électriques ne peuvent donc en aucune sorte être définies ou caractérisées, ni par la quantité d'électricité qu'elles mettent en circulation, ni par l'intensité des courans qu'elles produisent; car ces élémens sont essentiellement variables et

liés, comme nous venons de le voir, par des lois très simples à la nature du circuit dans lequel passe le courant émané de la source.

Tension des sources électriques. Mais il y a un autre élément qui peut caractériser les sources électriques, c'est *la tension* que nous allons essayer de définir d'une manière rigoureuse. Nous appellons *sources électriques de même tension* celles qui, dans le même circuit, donnent des courans de même intensité; et une source aura une tension double d'une autre quand, dans le même circuit, elle donnera un courant d'une intensité double, etc., etc.

Les principes que nous avons établis pour transformer un circuit en un autre équivalent, permettent toujours de comparer rigoureusement deux circuits quelconques ; au reste, nous allons entrer dans quelques détails.

Si nous considérons, par exemple, la source thermo-électrique bismuth et cuivre, nous dirons que sa tension augmente proportionnellement à la différence de température des deux soudures, puisque dans le même circuit elle donne des courans dont l'intensité augmente en raison directe de cette différence.

Si nous considérons maintenant une pile hydro-électrique ordinaire d'un nombre quelconque d'élémens, dont la résistance soit par exemple de 100 mètres d'un fil de cuivre, et dont le courant ait une certaine intensité 1, lorsque l'on complète le circuit avec un fil pareil de 20 mètres de longueur ; puis, si en ajoutant de l'acide on trouve que la résistance se réduit à 20 mètres, et qu'en complètant le circuit avec le même fil de vingt mètres son intensité se trouve quadruple, nous dirons que la tension de la pile n'est pas changée, bien qu'elle paraisse quatre fois plus forte : car dans le premier cas son circuit était de 120 mètres, et il est de 30 dans le second ; donc ici, à égalité de tension, l'intensité doit être quadruple. Si, au contraire, en ajoutant l'acide la résistance reste la même, et si avec le même fil addition-

nel de 20 mètres l'intensité est décuplée, nous dirons que la tension est aussi décuplée, puisque l'intensité est décuple avec le même circuit.

Ces considérations, que nous regrettons de ne pouvoir développer davantage, sont la clef d'un grand nombre de phénomènes qui paraissent inexplicables lorsqu'on ne les rapporte pas aux lois fondamentales que nous avons essayé d'établir.

300. *Source électrique prise pour unité de tension.* Puisque les sources électriques peuvent être rigoureusement définies par leurs tensions, il est très important d'avoir une unité commune à laquelle tous les observateurs puissent rapporter leurs résultats. L'unité qui m'a paru la plus convenable pour remplir le but est la source thermo-électrique bismuth et cuivre, dont nous avons parlé (289) et que nous avons indiquée comme pouvant servir à la mesure du magnétisme terrestre.

Pour rapporter à cette unité la tension d'une source quelconque, il suffit de trouver les sensibilités relatives de la *boussole terrestre* (*figure* 452), et d'une autre boussole propre à mesurer l'intensité du courant produit par la source dont on veut avoir la tension. S'il s'agit, par exemple, de la grande boussole de la figure 462, qui peut servir à tous les courans hydro-électriques un peu énergiques, on procède de la manière suivante :

On fait passer sur le cadre de la grande boussole cent tours d'un fil très fin ; prenant ensuite un courant quelconque suffisamment affaibli soit par une longueur convenable du fil de platine de 200 mètres, soit par des colonnes liquides, on oblige ce courant à passer à la fois par la grande boussole et sur la boussole terrestre, muni de son fil de 20 mètres, et l'on observe les déviations qui en résultent.

Soit d la déviation de la boussole terrestre, et d' celle de la grande boussole ; la sensibilité s de celle-ci avec ces cent tours sera :

$$s = \frac{sin.d'}{sin.d},$$

en prenant pour unité la sensibilité de la boussole terrestre avec ses vingt tours.

Or pour un tour de la grande boussole, sa sensibilité sera :

$$\frac{s}{100},$$

et, pour un nombre n de tours, elle sera

$$\frac{ns}{100}.$$

La valeur de s étant une fois connue, lorsqu'on voudra comparer la tension d'une source à celle qui est prise pour unité, il faudra : 1° déterminer la longueur totale m du circuit qui compose le courant de cette source, en l'évaluant au moyen du fil de cuivre de la boussole terrestre ; 2° observer la déviation a que le courant produit sur la grande boussole avec un nombre n de tours, en choisissant ce nombre de tours de telle sorte que la déviation soit au moins 4 ou 5 degrés, et au plus de 65 ou 70.

Alors le calcul sera simple, car, avec une sensibilité connue $\frac{ns}{100}$, l'intensité du courant étant $sin.\ a$, elle serait :

$$\frac{100}{ns}.\ sin.\ a$$

sur la boussole terrestre, dont la sensibilité est 1.

Le courant de la source prise pour unité produisant sur le même appareil une déviation d, l'intensité du premier courant est à celle du second comme $\frac{100}{ns}\ sin.\ a$ est à $sin.\ d$.

Connaissant le rapport des intensités, il suffit de le multiplier par le rapport des longueurs pour avoir le rapport des tensions, ou la tension t de la source, qui est, par conséquent,

$$t = \frac{m}{20} \cdot \frac{100}{} \cdot \frac{sin.\ a,}{sin.\ d.}$$

301. *Quantité d'électricité nécessaire pour décomposer un gramme d'eau.* L'appareil qui a servi à la décomposition de l'eau est représenté dans les figures 470 et 471. Il est disposé pour que les fils de platine qui sont soudés au tube de verre restent bien à égale distance pendant toute la durée d'une expérience. La cloche destinée à recevoir l'hydrogène est longue, étroite et graduée, afin que le volume de ce gaz puisse être mesuré avec exactitude. A côté de cet appareil est un compteur avec lequel on note exactement la durée de l'expérience, depuis l'instant où l'on établit la communication jusqu'à l'instant où l'on obtient le volume d'hydrogène auquel on veut s'arrêter. Ce volume a été de 2 centimètres cubes pour les décompositions lentes, et de 6,8 ou 10 centimètres cubes pour les décompositions rapides : mais toutes ces expériences ont été ramenées à 2 centimètres cubes.

On procède de la manière suivante :

Par des expériences préalables on détermine la résistance de la pile, celle du liquide soumis à la décomposition, et celle des autres conducteurs. Cette résistance totale est exprimée en longueur du fil de cuivre de la grande boussole des sinus (*fig.* 462), qui est un appareil extrêmement commode pour ces recherches. Cette résistance une fois connue, on trouve également la longueur totale du circuit; cela fait, on rompt les communications pour remplir les cloches de liquide, on remet en place les fils de platine, et l'on compte le temps au moment où les communications sont rétablies; on observe pareillement la déviation de la boussole, qui reste constante, et on laisse marcher l'expérience jusqu'à ce que l'on ait obtenu le volume convenable d'hydrogène.

Le tableau suivant contient une série d'expériences de cette nature :

NUMEROS de l'expérience.	NATURE du LIQUIDE.	MÉTAL qui forme les pôles. PÔLE positif.	PÔLE négatif.	NOMBRE de secondes pour obtenir deux centimètres cubes d'hydrogène.	DEVIATION de l'aiguille de la boussole.	SINUS de la déviation, ou intensité.	PRODUIT de l'intensité par le temps.
1	Eau distillée avec acide sulfurique.	Platine .	Platine .	498"	5° 50'	0,1016	50,60
2		Id. . .	Id. . .	510	5 40	0,0987	50,34
3	Liquide précédent étendu d'un volume d'eau distillée .	Id. . .	Id. . .	725	4 »	0,0697	50,55
4		Id. . .	Id. . .	728	4 »	0.0697	50,74
5		Id. . .	Id. . .	919	3 10	0,0552	50.75
6	Eau ordinaire avec acide sulfurique.	Id. . .	Id. . .	417	6 50	0,1190	49,62
7		Id. . .	Id. . .	425	6 45	0,1175	49,70
8		Cuivre .	Id. . .	251	11 20	0,1965	49,52
9		Id. . .	Id. . .	247	11 30	0,1994	49,25
10		Id. . .	Id. . .	247	11 30	0,1994	49,25
11		Zinc . .	Id. . .	259	12 »	0,2080	49,71
12		Id. . .	Id. . .	258	11 »	0,1908	49,22
13		Platine .	Id. . .	684	4 10	0,0724	49,50
14	Acide sulfurique étendu.	Id. . .	Id. . .	77	40 »	0,6428	49,50

La troisième colonne de cè tableau indique la nature du métal qui forme le pôle positif, auquel doit se rendre l'oxigène provenant de la décomposition ; cette indication est importante, parce qu'il arrive que, *toutes les conditions restant les mêmes*, si l'on substitue au platine du pôle positif une lame de cuivre ou de zinc, le courant prend à l'instant une intensité beaucoup plus grande ; pour le zinc, cette intensité devient triple, quelle que soit, du reste, l'intensité primitive. Ce phénomène extrêmement remarquable ne résulte pas de l'action chimique que le zinc éprouve, il dépend d'autres causes dont l'étude jettera sans doute un nouveau jour sur les lois de la communication de l'électricité.

Cependant, la septième colonne de ce tableau fait voir que, malgré cette action singulière, le produit du temps, par l'intensité du courant, donne un nombre constant ; ou, en d'autres termes, que la quantité d'hydrogène mise en liberté est toujours proportionnelle à l'intensité du courant, soit que cette intensité résulte de la force de la pile ou de la conductibilité

du liquide soumis à l'expérience ou de quelque autre circonstance quelconque.

Or, comme nous avons vu précédemment que l'intensité du courant est proportionnelle à la quantité d'électricité qui passe, il en résulte que la quantité d'hydrogène dégagée est elle-même proportionnelle à la quantité d'électricité qui concourt à sa décomposition, ou enfin qu'il faut toujours la même quantité d'électricité pour décomposer un gramme d'eau.

Reste à trouver maintenant quelle est cette quantité d'électricité ; ce qui devient très facile, d'après les principes que nous avons établis.

En effet, en choisissant, par exemple, les deux premières observations du tableau, l'expérience a fait voir que la longueur totale du circuit était équivalente à 5679 mètres du fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre, savoir : 5531 mètres pour la résistance du liquide soumis à la décomposition, et 148 mètres pour celle de la pile elle-même et du fil de la boussole.

On a observé d'ailleurs que l'intensité de ce courant était 2,665 par rapport au courant de 20 mètres de la source thermo-électrique.

Ainsi, la quantité d'électricité qui passe dans l'eau acidulée pour en opérer la décomposition et pour donner 2^{cc} d'hydrogène en 500″, est 2,665 fois la quantité qui passe dans le même temps par l'élément bismuth et cuivre pris pour unité.

On voit pareillement que la tension de la pile qui produit a décomposition est :

$$2{,}665 \times \frac{5679}{20} = 756{,}72.$$

Un gramme d'eau contenant 1241^{cc}, 61 d'hydrogène, on voit que, pour opérer la décomposition d'un gramme d'eau, il faut une quantité d'électricité exprimée par

$$1654{,}445,$$

c'est-à-dire plus de 1600 fois celle qui passe pendant 500 secondes dans la source prise pour unité, et, si l'on prend la minute pour unité de temps, on voit enfin que la quantité d'électricité nécessaire pour décomposer un gramme d'eau est

13787.

Ainsi, soit qu'un gramme d'eau appartienne à un liquide bon ou mauvais conducteur, soit qu'il se trouve décomposé par une pile très forte ou très faible, il faudra toujours, pour en séparer les élémens, une quantité d'électricité égale à 13787 fois la quantité d'électricité qui passe en 1 minute dans un circuit bismuth et cuivre dont la longueur totale est équivalente à 20 mètres d'un fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre, et dont les deux soudures ont une différence de température de 100°.

FIN DU PREMIER VOLUME.

TABLE DES MATIÈRES

DU PREMIER VOLUME.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

CHAPITRE PREMIER.

Numéros. Pages.

1. Des phénomènes naturels 1
2. De l'espace. 3
3. Du temps 4
4. De la matière et des divers états des corps 5
5. Des forces 8
6. Du repos et du mouvement 10
7. De l'inertie. 13

CHAPITRE II.

8. Propriétés générales des corps. 15
9. Divisibilité. . . . . *ib.*
10. Porosité 23
11. Compressibilité 29
12. Elasticité 31
13. Dilatabilité. 33

CHAPITRE III.

Equilibre et Mouvement.

14. Objet de la statique et de la dynamique. 36
15. Comparaison des forces 37
16. Ce qu'on entend par système de forces et par résultante. *ib.*
17. Résultante de plusieurs forces dirigées suivant la même ligne. 38
18. Résultante de deux forces qui agissent sur le même point. *ib.*
19. Décomposition des forces 39
20. Résultante d'un nombre quelconque de forces agissant au même point 40
21. Résultante des forces parallèles . . . . . *ib.*
22. Des couples 41
23. Levier . . . . . *ib.*
24. Pression sur le point d'appui du levier 42
25. Levier du 1er, du 2e et du 3e genre. . . . . *ib.*
26. Mouvement uniforme 43

27. Conséquences de l'inertie de la matière 43
28. La transmission du mouvement n'est pas instantanée. . 44
29. Quantité de mouvement 45
30. Communication du mouvement. 47
31. Force centrifuge. 53
32. Mouvement uniformément accéléré 55
33. Vitesse du mouvement varié en général . . . . . *ib.*
34. Lois et formules du mouvement uniformément accéléré. 56

LIVRE PREMIER.

DE LA PESANTEUR.

CHAPITRE I.

Direction de la pesanteur.

35. Effets généraux de la pesanteur 57
36. Direction de la pesanteur 59

CHAPITRE II.

Loi de la chute des corps.

37. Chute des corps dans l'air 64
38. Chute des corps dans le vide. 65
39. Plan incliné de Galilée. 66
40. Machine d'Atwood. . . . . *ib.*

CHAPITRE III.

Equilibre des corps pesans.

41. Différence entre la pesanteur et le poids 71
42. Centre de gravité. . . . . *ib.*
43. Equilibre des corps pesans. 74
44. Effets moléculaires dont il faut tenir compte dans l'équilibre. 76
45. Description de la balance 77
46. Du poids, de la masse et de la densité. 80

CHAPITRE IV.

Pendule.

47. Définitions relatives au pendule. 84
48. Lois des oscillations du pendule. 85
49. Intensité de la pesanteur, et pendule simple. 88
50. Pendule composé 89
51. Figure de la terre 92
52. Usage du pendule pour déterminer l'aplatissement de la terre 96

53. Déviation du fil à plomb par l'attraction des montagnes 97
54. Densité moyenne de la terre par l'appareil de Cavendish. 98

CHAPITRE V.

Hydrostatique.

55. Objet de l'hydrostatique 102
56. Principe d'égalité de pression . . . . . *ib.*
57. Conditions d'équilibre des liquides pesans 104
58. Détermination des pressions qui s'exercent sur les parois 107
59. Centre de pression. 111
60. Equilibre des liquides dans les vases communiquans . . 112
61. Du niveau des mers 113
62. Phénomènes qu'on observe à l'embouchure des fleuves. 115

CHAPITRE VI.

Equilibre des gaz.

63. Notions sur la hauteur de l'atmosphère 118
64. Les gaz sont soumis à la pesanteur et à l'action moléculaire 119
65. Expérience qui démontre la pesanteur de l'air . . . . . *ib.*
66. Expérience qui démontre l'action moléculaire et l'élasticité des gaz . . . . . *ib.*
67. Conditions d'équilibre des gaz. 121
68. Pression atmosphérique 124
69. Mesure de la pression atmosphérique 125
70. Construction du baromètre 129
71. Baromètre ordinaire 130
72. Baromètre à cadran de Jecker. 131
73. Baromètre de Gay-Lussac . . . . . *ib.*
74. Baromètre de Fortin. 132
75. Variations du baromètre . . . . . *ib.*
76. Hauteurs moyennes du baromètre. 133
77. Variations accidentelles 134
78. Variations horaires. 136
79. Loi de Mariotte 137
80. Machine pneumatique 142
81. Machine de compression. 147
82. Pompe de compression 148
83. Monomètre et mesure de la pression des gaz dans divers appareils . . . . . *ib.*
84. Fusil à vent. 150

CHAPITRE VII.

Corps flottans.

85. Corps pesans qui s'élèvent dans les fluides 151

86. Principe d'Archimède 151
87. Conditions d'équilibre des corps plongés 154
87 *bis*. Conditions d'équilibre des corps flottans 157
88. Montgolfières et aérostats . . . . . *ib.*

CHAPITRE VIII.

Principes d'hydrodynamique.

89. Objet de l'hydrodynamique 161
90. Conditions de l'écoulement des fluides et théorème de Toricelli . . . . . *ib.*
91. Divers moyens d'obtenir une pression constante 164
92. Vérification expérimentale du théorème de Toricelli. . 166
93. Constitution de la veine fluide 168
94. Des ajutages et de leur influence sur l'écoulement . . . 170
95. Unité des mesures pour la distribution des eaux 172
96. Pressions latérales exercées par les liquides en mouvement . . . . . *ib.*
97. Réaction produite par l'écoulement des fluides. 174
98. Jets d'eau 175
99. Effets du choc d'une veine fluide contre un corps solide. 176
100. Effets du choc de deux veines fluides opposées. 179
101. Divers appareils fondés sur les pressions de l'air et des liquides. 182
102. Siphon . . . . . *ib.*
103. Fontaine de compression 183
104. Fontaine intermittente 184
105. Fontaine de héron. . . . . *ib.*
106. Lampe à gaz hydrogène 185
107. Pompe aspirante et élévatoire. . . . . *ib.*
108. Pompe aspirante et foulante à corps de pompe alezé . . 186
109. Pompe aspirante et foulante *dite* à plongeur 187
110. Pompe des prêtres. 188
111. Presse hydraulique. . . . . *ib.*
112. Bélier hydraulique. 190

CHAPITRE IX.

Mouvement des gaz.

113. Analogie des liquides et des gaz pour l'écoulement. . . 193
114. Gazometres . . . . . *ib.*
115. Théorie de Bernouilli pour l'écoulement des gaz. . . . 194
116. Théorie de Navier 195
117. Vitesses théoriques et vitesses effectives . . . . . *ib.*
118. Machine soufflante. 196
119. Pressions latérales exercées par les gaz en mouvement. 197

LIVRE DEUXIÈME.

De la Chaleur.

NOTIONS GÉNÉRALES.

120. Fluide igné, matière du feu, chaleur, calorique 198
121. Divisions adoptées dans l'étude du calorique 199
122. Changement de volume. 200
123. Changement d'état. 201
124. Propagation du calorique 203
125. Calorimétrie 204

PREMIÈRE PARTIE.

Changement de volume et changement d'état des corps.

Première Section.

CHANGEMENT DE VOLUME.

CHAPITRE I.

Dilatation.

126. Construction du thermomètre à mercure 209
127. Formules de dilatation. 214
128. Dilatation des corps solides 216
129. Application de la dilatation des solides. 223
130. Dilatation des liquides. 226
131. Dilatation des gaz 230

CHAPITRE II.

Densité.

132. Unité que l'on adopte pour les densités. 239
133. Densité des gaz . . . . . *ib.*
134. Densité de l'eau distillée 242
135. Densité des liquides 244
136. Aréomètre 245
137. Densité des corps solides. 248

Deuxième Section.

CHANGEMENT D'ÉTAT DES CORPS.

CHAPITRE I.

Fusion et solidification.

138. Fusion 252

139. Conditions de la fusion 254
140. Solidification 257

CHAPITRE II.

Vapeurs dans le vide.

141. Formation des vapeurs dans l'air et dans le vide 261
142. Maximum de tension ou de force élastique 263
143. Equilibre de tension dans un espace inégalement chaud. 265
144. Mesure de la force élastique de la vapeur d'eau 267
145. Tension des vapeurs des différens liquides. 273
146. Densité de la vapeur d'eau. 274
147. Condensation des vapeurs, liquéfaction des gaz 283

CHAPITRE III.

Mélange des vapeurs avec les gaz.

148. Les densités des fluides élastiques n'ont pas d'influence sur leur mélange 286

CHAPITRE IV.

Ebullition et évaporation.

149. Formation des vapeurs par simple évaporation et par ébullition. 291
150. Condition de l'ébullition. . . . . *ib.*
151. Diverses causes qui ont de l'influence sur le point d'ébullition 292
152. Rapidité de l'ébullition 301
153. Tableau du point d'ébullition des différens liquides . . 302
154. Phénomènes que présentent les liquides en contact avec les corps très chauds . . . . . *ib.*
155. Evaporation 303
156. Froid produit par l'évaporation 305

LIVRE TROISIÈME.

Première Section.

Magnétisme et Électricité.

MAGNÉTISME.

CHAPITRE I.

Action des aimans sur eux-mêmes et sur les corps magnétiques.

157. Définition de l'aimant et du magnétisme. 308
158. Tout aimant a une ligne moyenne et deux pôles. 310

159. Les pôles de mêmes noms se repoussent, et les pôles de noms contraires s'attirent. 312
160 Les actions magnétiques peuvent être attribuées à un fluide particulier 313
161. Sous l'influence de l'aimant le fer devient lui-même un aimant. 315
162. Les fluides magnétiques ne passent pas de l'aimant au fer, et n'éprouvent pas un déplacement sensible dans l'intérieur des corps. 317
163. L'acier prend toutes les propriétés magnétiques des aimans 319
164. Des diverses substances magnétiques et de leur force coercitive 322
165. Moyen de reconnaître si une substance est simplement magnétique ou si elle est aimantée . . . . . *ib.*

CHAPITRE II.

Action magnétique de la terre.

166. Direction des aimans, méridien magnétique, déclinaison, inclinaison. 326
167. La force magnétique de la terre peut être représentée par une couple 329
168. Boussole de déclinaison 331
168 *bis*. Boussole d'inclinaison 336
169. Boussole des variations diurnes 339
170. Perturbations de l'aiguille aimantée. 343
171. Intensité magnétique de la terre. 344
172. Action magnétique de la terre sur le fer doux 349
173. Causes diverses qui font varier les forces coercitives . . 350
174. Compensateur destiné à corriger l'action de la terre sur le fer des vaisseaux 353
175. Influence de l'action de la terre sur la marche des chronomètres 358

CHAPITRE III.

Loi générales du magnétisme.

176. Comparaison des forces magnétiques 359
177. Méthode des oscillations. . . . . *ib.*
178. Balance de torsion. 362
179. Loi des attractions et des répulsions magnétiques. . . . 365
180. Distribution du magnétisme dans les barreaux aimantés. 367
181. Idée générale de la théorie du magnétisme 370

CHAPITRE IV.

Procédé d'aimantation.

182. Procédé de Duhamel ou de la touche séparée 373
183. Procédé d'Œpinus ou de la double touche 374
184. Du point de saturation. 375
185. Influence de la trempe sur la force coercitive 377

186. Influence de la chaleur sur le magnétisme. 379
187. Causes qui déterminent l'aimantation. 381
188. Des aimans naturels et artificiels 382

Deuxième Section.

ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE I.

Des actions électriques.

189. Substances qui prennent par le frottement la propriété d'attirer les corps légers.—Electroscope. 386
190. Corps conducteurs et non conducteurs 388
191. Les phénomènes électriques se produisent comme s'il y avait deux espèces d'électricité 391
192. Des fluides électriques et de l'état naturel des corps. . 392
193. De la communication de l'électricité 395

CHAPITRE II.

Électricité par influence.

194. Un corps électrisé décompose à distance les électricités naturelles de tous les corps conducteurs. 398
195. Les corps électrisés par influence retombent à l'état naturel dès que l'influence cesse. 401
196. Phénomène que présente un corps électrisé par influence et communiquant au sol 403
197. Construction et usage des divers électroscopes 404
198. Electrophore. 406
199. Machines électriques. 407
200. Expériences diverses au moyen des machines électriques. 409

CHAPITRE III.

Loi des forces électriques.

201. Les attractions et répulsions électriques sont en raison composée des quantités de fluides, et en raison inverse du carré de la distance 411
202. Perte de l'électricité par l'air et par les supports. 413
203. Distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs. 416

CHAPITRE IV.

Électricité dissimulée.

204. De la dissimulation de l'électricité et de sa recomposition lente et subite. 425
205. Condensateurs 428
206. Bouteilles de Leyde et batteries électriques. 430

CHAPITRE V.

Lumière électrique et mouvement des corps électrisés.

207. Conditions générales sous lesquelles l'électricité produit de la lumière 440
208. Lumière électrique dans les gaz sous la pression atmosphérique . . . . . *ib.*
209. Lumière électrique dans les gaz raréfiés. 443
210. Diverses causes auxquelles on attribue la lumière électrique 445
211. Mouvemens des corps non conducteurs électrisés . . . 446
212. Mouvemens des corps conducteurs électrisés 448
213. Mouvemens produits par l'écoulement de l'électricité. . *ib.*
214. Mouvemens produits par les décompositions instantanées. 449

CHAPITRE VI.

Électricité développée par la pression et par la chaleur.

215. Le frottement n'est pas la seule cause du développement de l'électricité 451
216. Développement de l'électricité par la pression. . . . . *ib.*
217. Développement de l'électricité par la chaleur. 452

Troisième Section.

GALVANISME.

CHAPITRE I.

De l'électricité développée par le contact.

218. Découverte du galvanisme. 455
219. Preuves directes du développement de l'électricité par le contact 460
220. De la force électro-motrice 461

CHAPITRE II.

Pile de Volta.

221. Principes de la construction de la pile 464
222. Pile isolée 466
223. Pile en activité. 468
224. Force de la pile 469
225. Diverses dispositions de la pile 470
226. Effets physiologiques de la pile 472
227. Effets physiques de la pile. 474
228. Effets chimiques de la pile 475

CHAPITRE III.

Pile sèche.

229. Construction de la pile de Zamboni 485
230. Propriétés des piles sèches 486
231. Electroscope de Bohnenberger. 489
232. Piles secondaires. . . . . *ib.*

Quatrième Section.

ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

CHAPITRE I.

De l'action des courans sur les courans.

233. Découverte de l'électro-magnétisme 491
234. Le courant tend à tourner l'aiguille en croix avec lui, le pôle austral à gauche 493
235. L'intensité de l'action du courant est en raison inverse de la simple distance 496
236. Conditions d'équilibre d'une aiguille aimantée soumise à l'action d'un courant rectiligne indéfini. 498
237. Multiplicateur ou galvanomètre 499
238. Aimantation par le courant de la pile et par l'électricité ordinaire 502
239. Rotation des aimans par l'influence des courans 506

CHAPITRE II.

Action de la terre et des aimans sur les courans.

240. Direction des courans par l'influence du magnétisme de la terre 508
241. Direction des courans verticaux par l'influence de la terre. 511
242. Rotation des courans horizontaux par l'influence de la terre. 513
243. Direction des courans par les aimans 514
244. Rotation des courans par les aimans. 515
245. De quelques phénomènes que présentent les courans qui passent dans le vide ou dans les liquides. 517

CHAPITRE III.

De l'action des courans sur les courans.

246. Découverte d'Ampère 520
247. Action des courans parallèles 521
248. Action des courans sinueux 522
249. Action des courans croisés. 523
250. Rotation d'un courant par l'action d'un courant 524

Théorie du magnétisme.

251. Théorie du magnétisme, en attribuant ses effets à des courans moléculaires 526
252. Direction du courant terrestre. 528
253. Position du courant terrestre 529

Action de la terre sur les courans.

254. Direction des courans fermés. 529
255. Rotation des courans horizontaux. 530

Actions de la terre sur les aimans.

256. Déclinaison. 530
257. Inclinaison. 531
258. Variations diurnes et perturbations. . . . . *ib.*

Action mutuelle des aimans et des courans.

259. Direction des aimans par les courans 532
260. Rotation des aimans par les courans 533
261. Rotation des courans par les aimans. 534

Action des aimans les uns sur les autres.

262. Attraction et répulsion des aimans. 537
263. Aimantation 538

CHAPITRE IV.

Causes diverses qui donnent naissance à des courans électriques.

264. Considérations générales sur l'origine des courans . . . 540

Actions mécaniques.

265. Frottement, pression, clivage. . . . . *ib.*
266. Simple pression. 545

Actions physiques.

267. Actions capillaires, chaleur, magnétisme, électricité. . *ib.*
268. Actions capillaires. 546
269. Action de la chaleur . . . . . *ib.*

Actions chimiques.

270. Combustion, action des acides sur les métaux ou sur leurs bases, réaction des dissolutions les unes sur les autres, et décompositions chimiques. 551

Actions physiologiques et poissons électriques.

271. Poissons électriques 558
272. Propriétés de la torpille 559
273. Propriétés du gymnote. 561
274. De l'organe électrique. 565

CHAPITRE V.

Phénomènes d'induction.

275. Définition 567
276. Proposition générale. . . . . *ib.*
277. Réaction des plis d'une hélice 571
278. Appareil électro-moteur produisant tous les effets de la pile 574
279. Phénomènes magnétiques qui semblent se développer dans les corps conducteurs lorsqu'ils se meuvent sous l'influence des aimans 576

CHAPITRE VI.

Loi générale d'intensité des courans électriques.

280. Division générale des courans adoptée pour cette étude. 582

Courans thermo-électriques.

281. L'intensité du courant est la même dans tous les points du circuit qu'il traverse . . . . . *ib.*
282. L'intensité du courant est en raison inverse de la longueur du circuit et en raison directe de la section. . 583
283. Conductibilité des différens métaux. 584
284. Intensité du courant dans un circuit simple et homogène. 588
285. Intensité du courant dans un circuit simple et hétérogène. 589
286. Courans complexes et dérivés 591
287. Théorie du multiplicateur appliquée au courant thermo-électrique. 602
288. Mesures des hautes températures 603
289. Intensité magnétique de la terre 606
290. Diverses sources thermo-électriques. 607
291. Piles thermo-électriques. 608

Courans hydro-électriques.

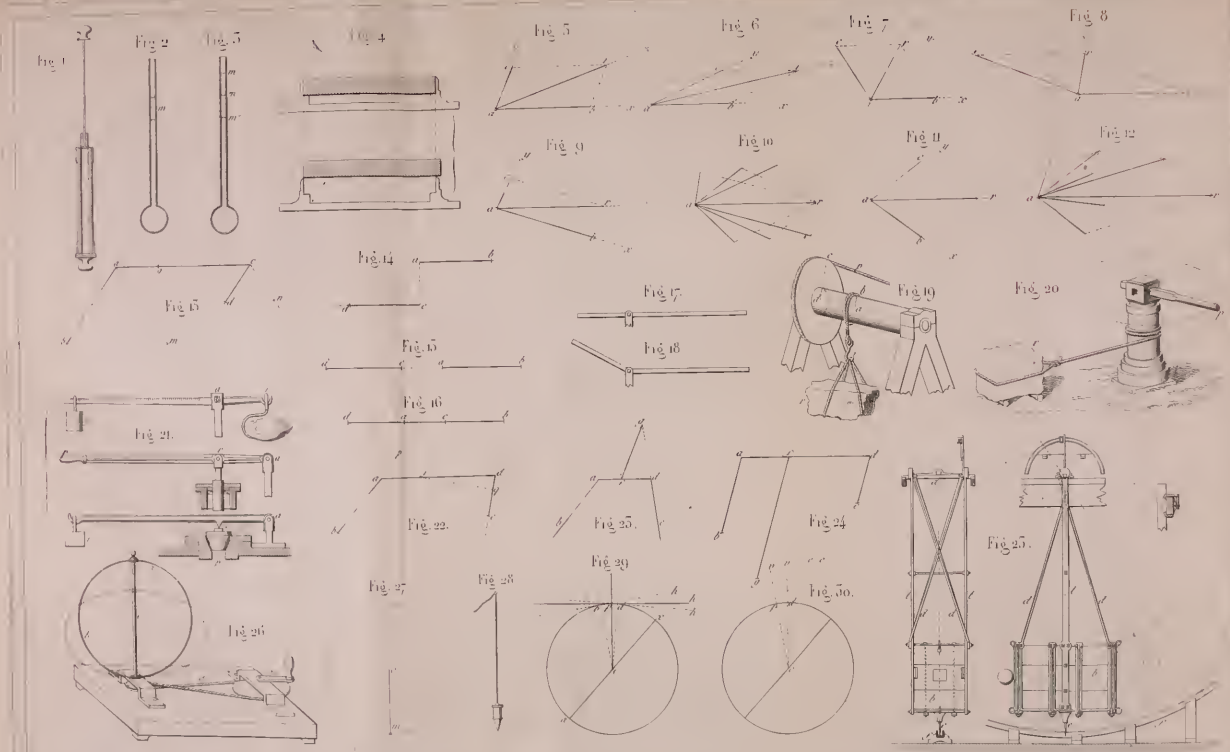
292. Boussole de sinus, et boussole de tangente. 611
293. Lois de l'intensité du courant produit par un élément . 613
294. Courans dérivés 617
295. Lois de l'intensité des courans produits par une pile . . *ib.*
296. Lois de l'intensité d'un courant produit par plusieurs élémens réunis pôle à pôle. 626

Comparaison des différentes sources électriques, etc.

297. Rapport de conductibilité des liquides et des métaux. . 627
298. Rapport d'intensité des courans thermo-électriques et hydro-électriques. 631
299. Définition de l'intensité des courans, de la quantité d'électricité qui les constitue, et de la tension des sources électriques 632
300. Source électrique prise pour unité de tension. 637
301. Quantité d'électricité nécessaire pour décomposer un gramme d'eau. 639

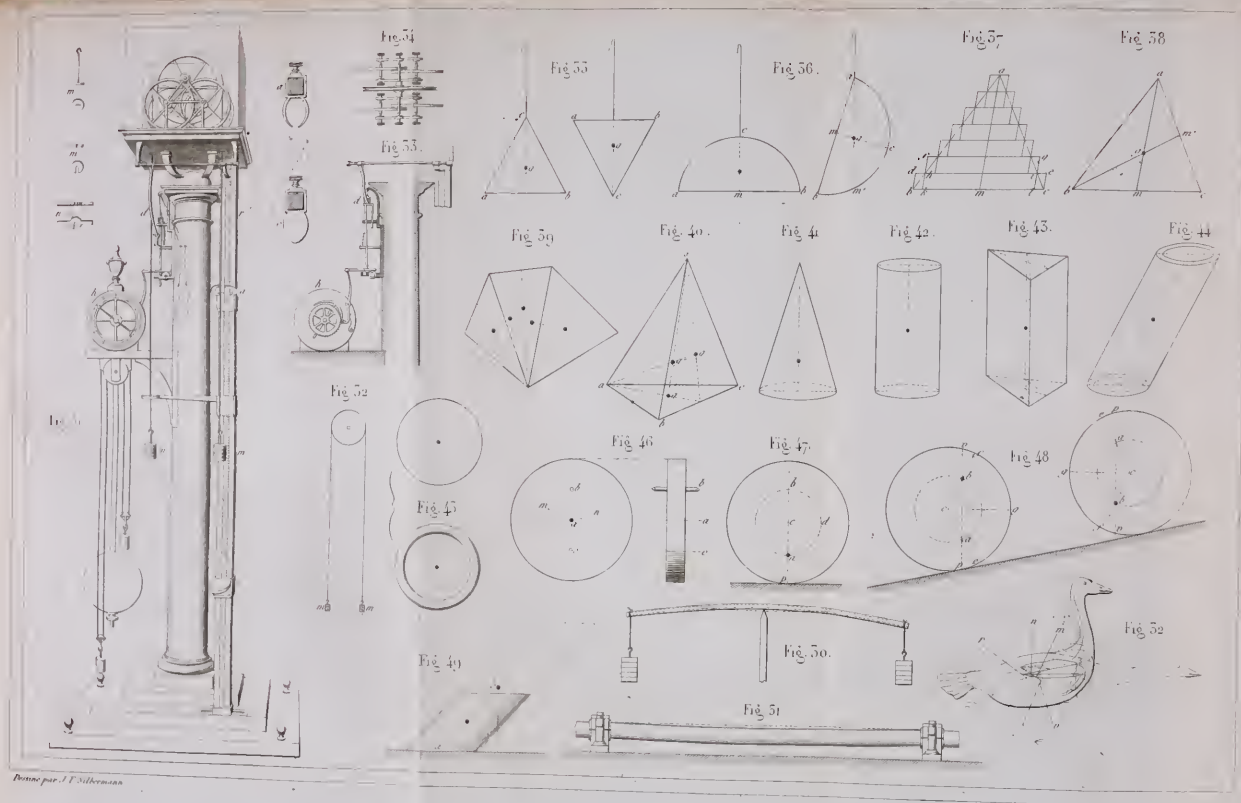
Dessiné par Poullet

PRÉLIMINAIRES ET STATIQUE



Gravé par Wilhemann

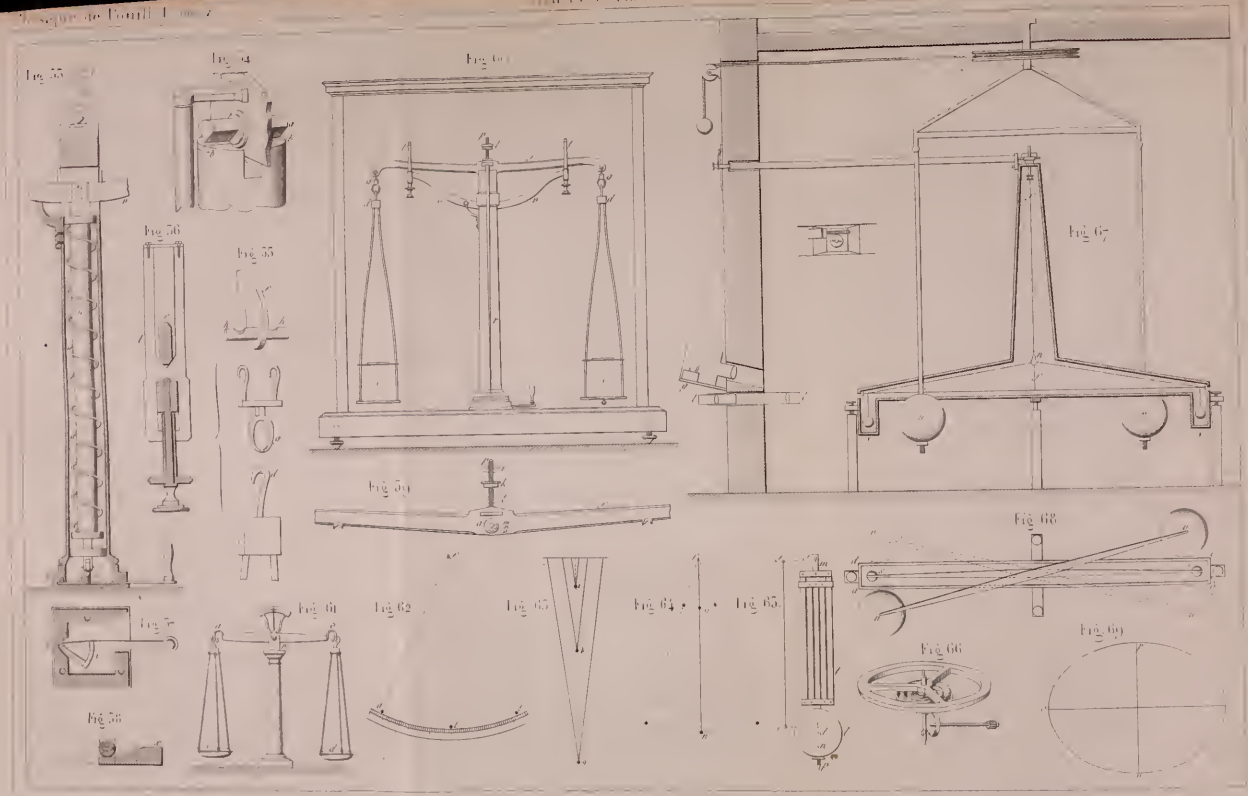
V.te Blanc Sculp.



Dessiné par J. F. Silbermann

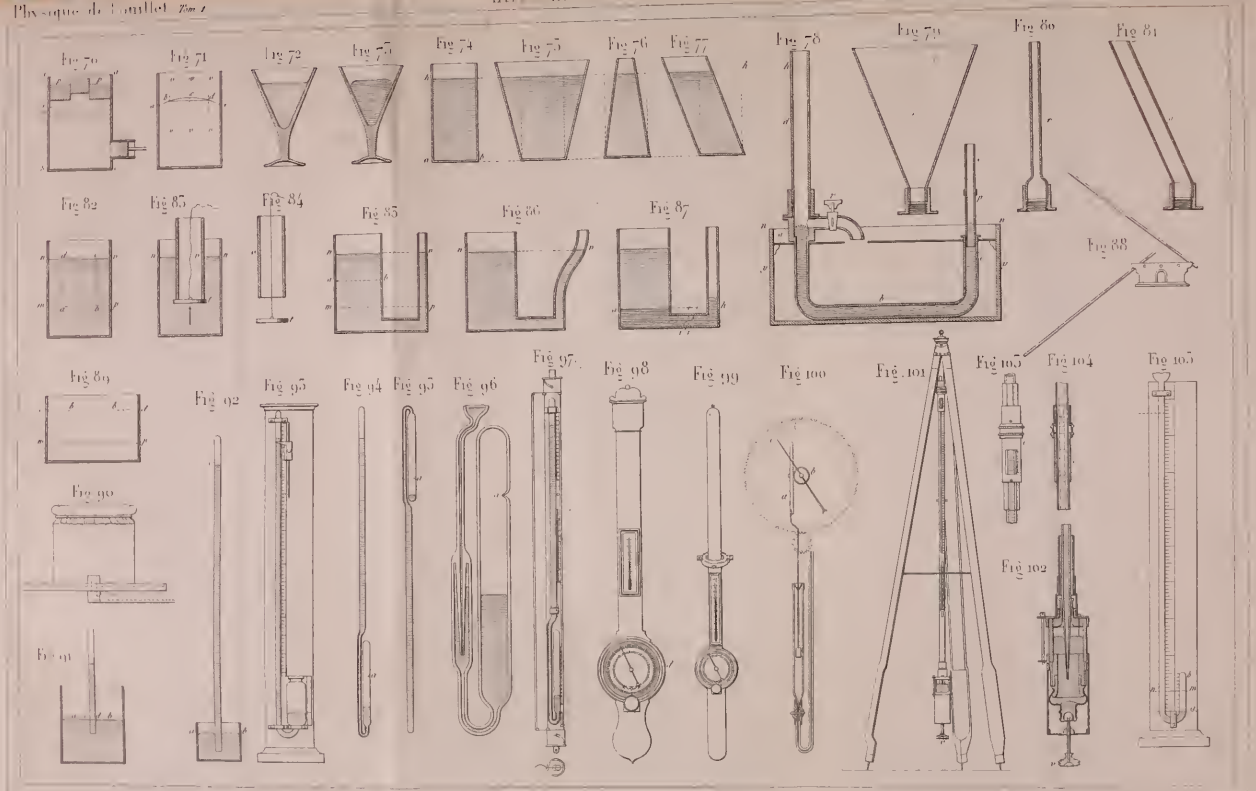
V. Le Blanc Sculp.

BALANCE-PENDULE



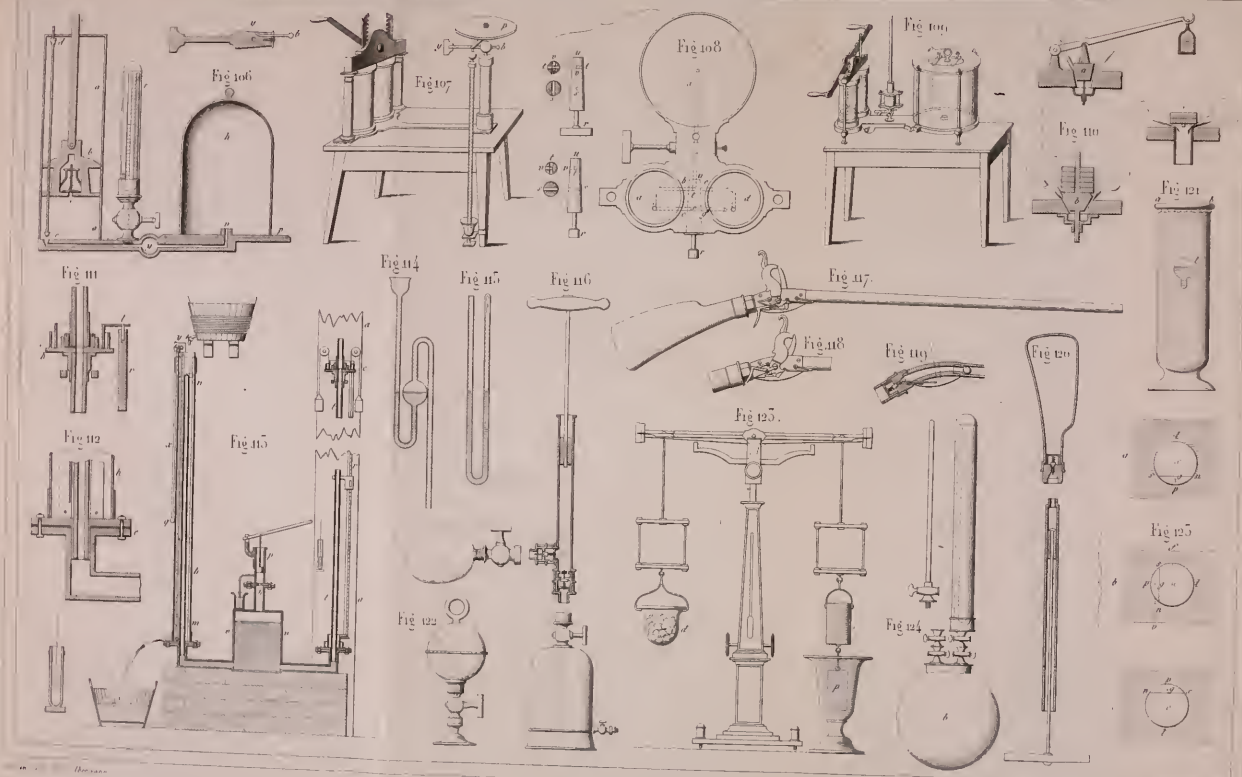
Gravé par J. T. Silbermann

Ch. Le Blanc sculp.

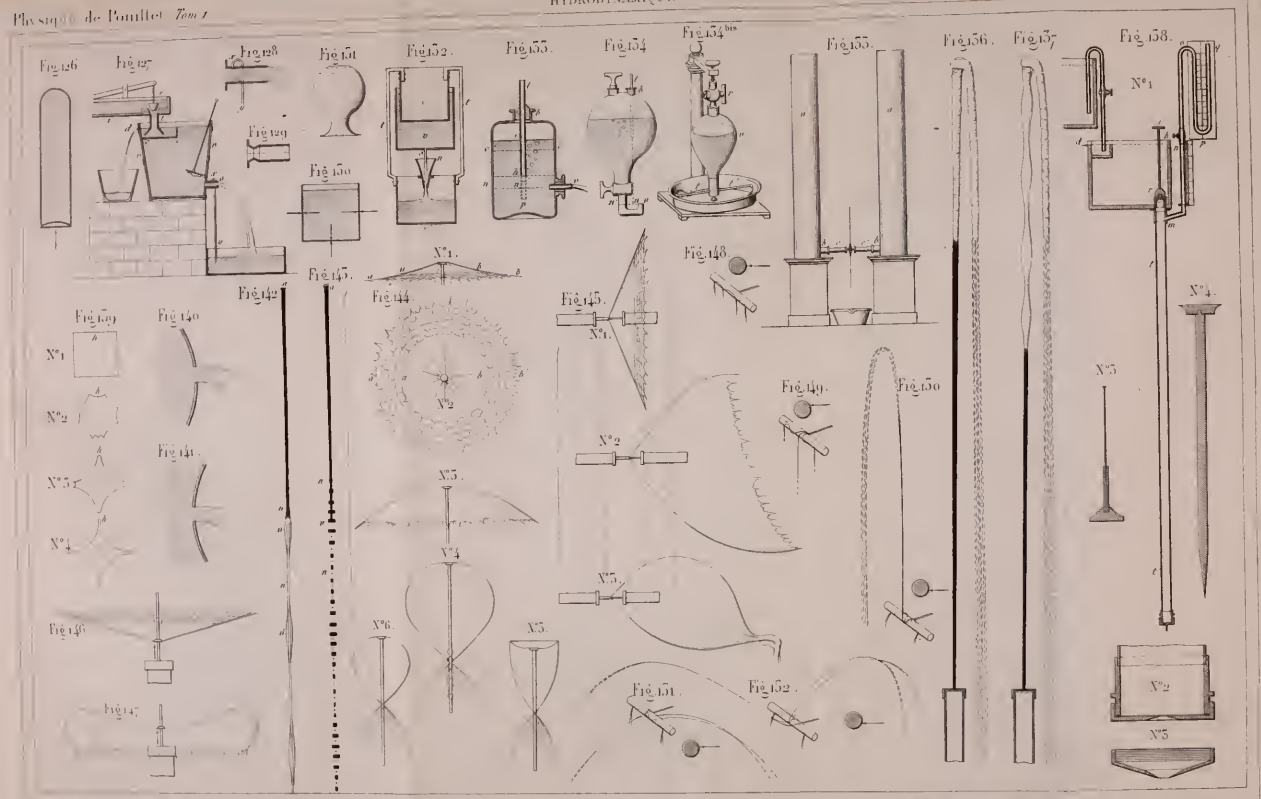


Dessiné par F.T. Silbermann

V. Le Blanc sculp.

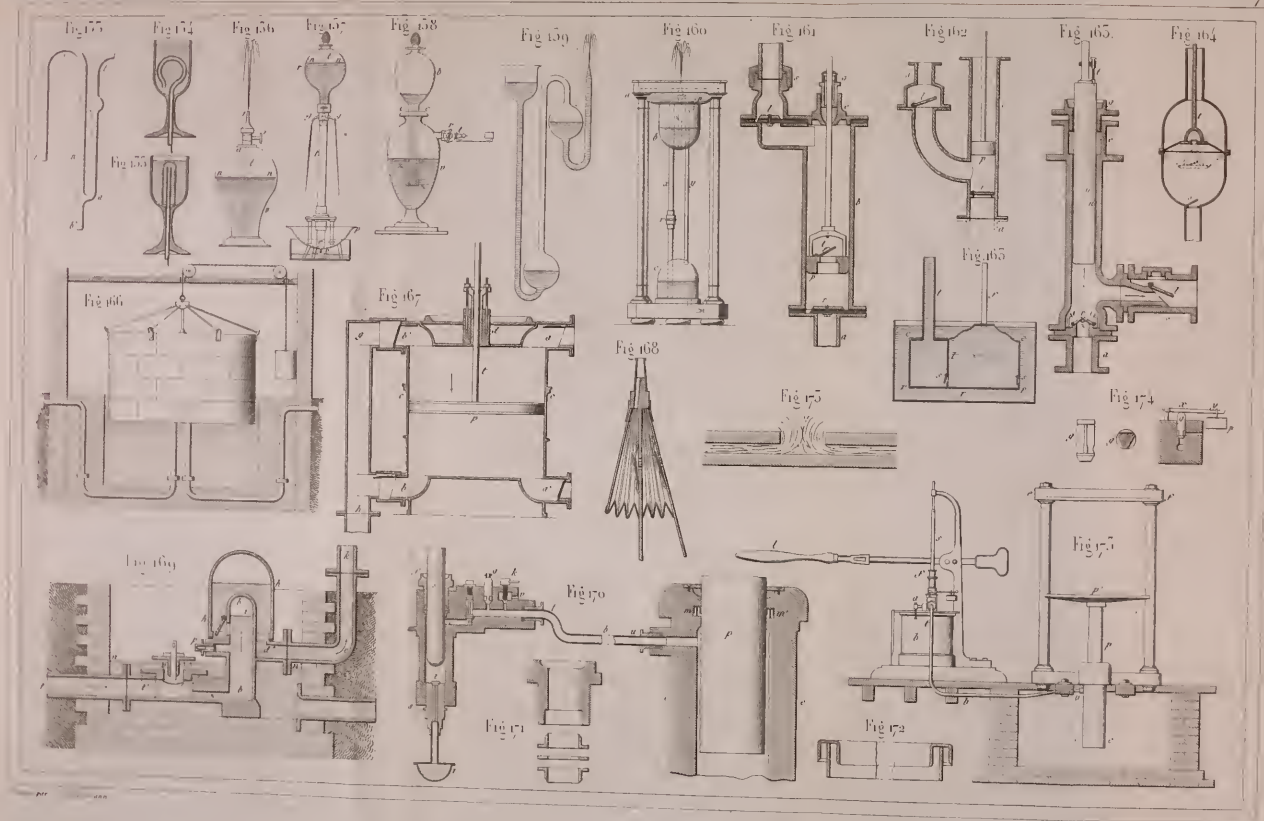


Dessin. Vil. Blan. Sculp.

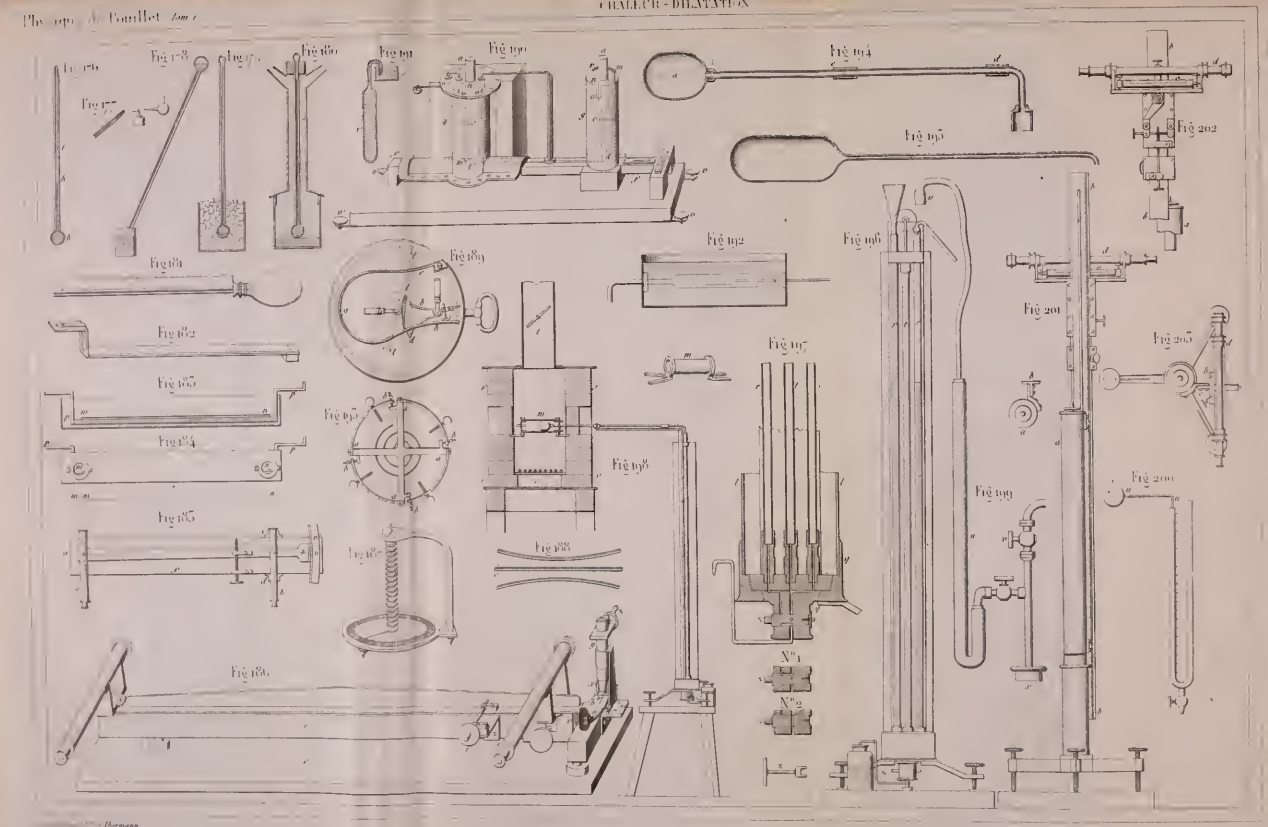


Dessiné par Silbermann

Vve Le Blanc Sculp

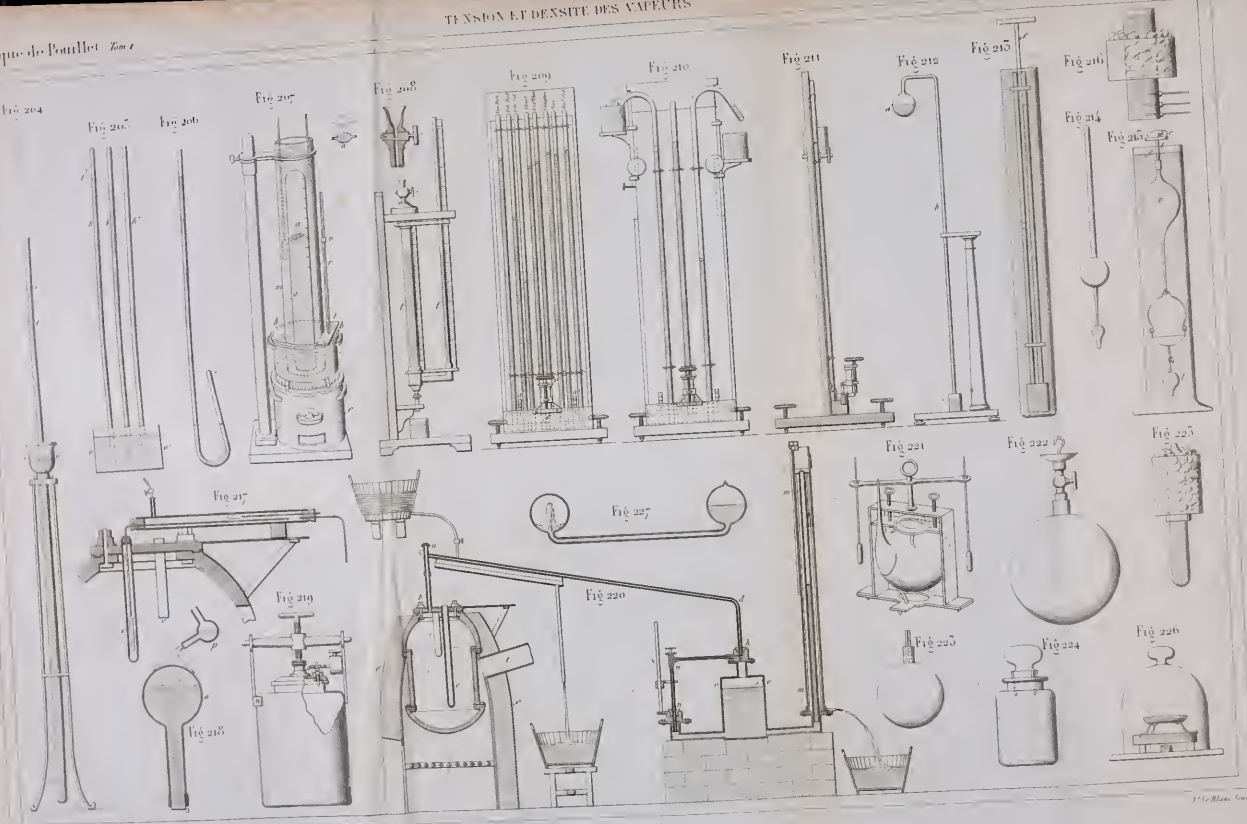


Le Blanc Sculp



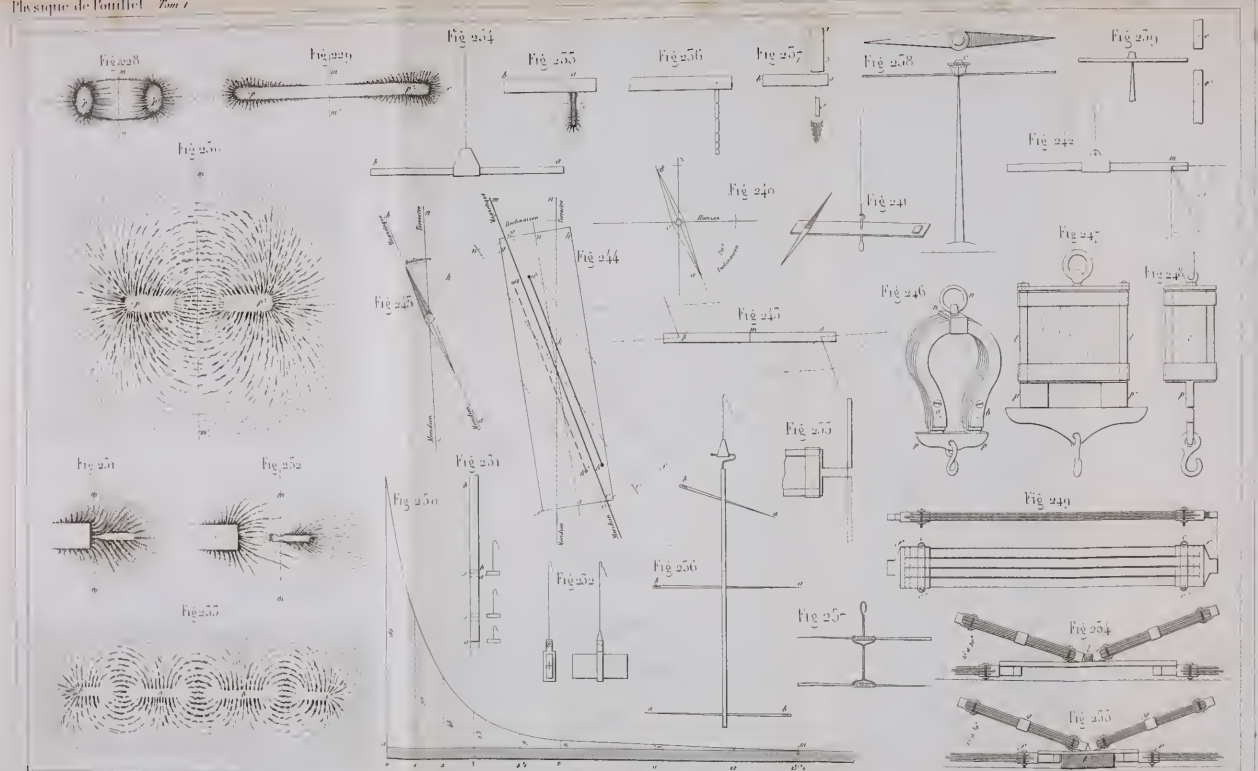
Thomann

V. Le Blanc sculp



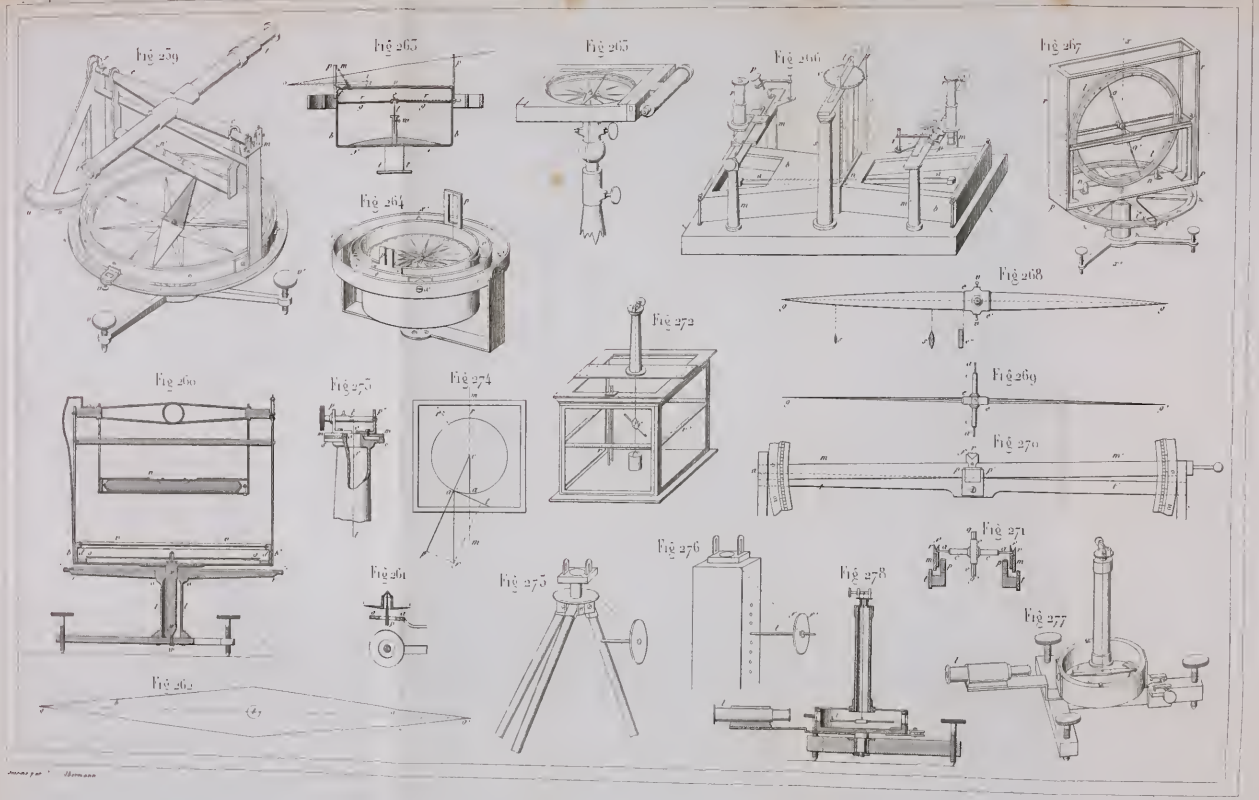
Dessiné par J.F. Schermann

Gravé par Blanc



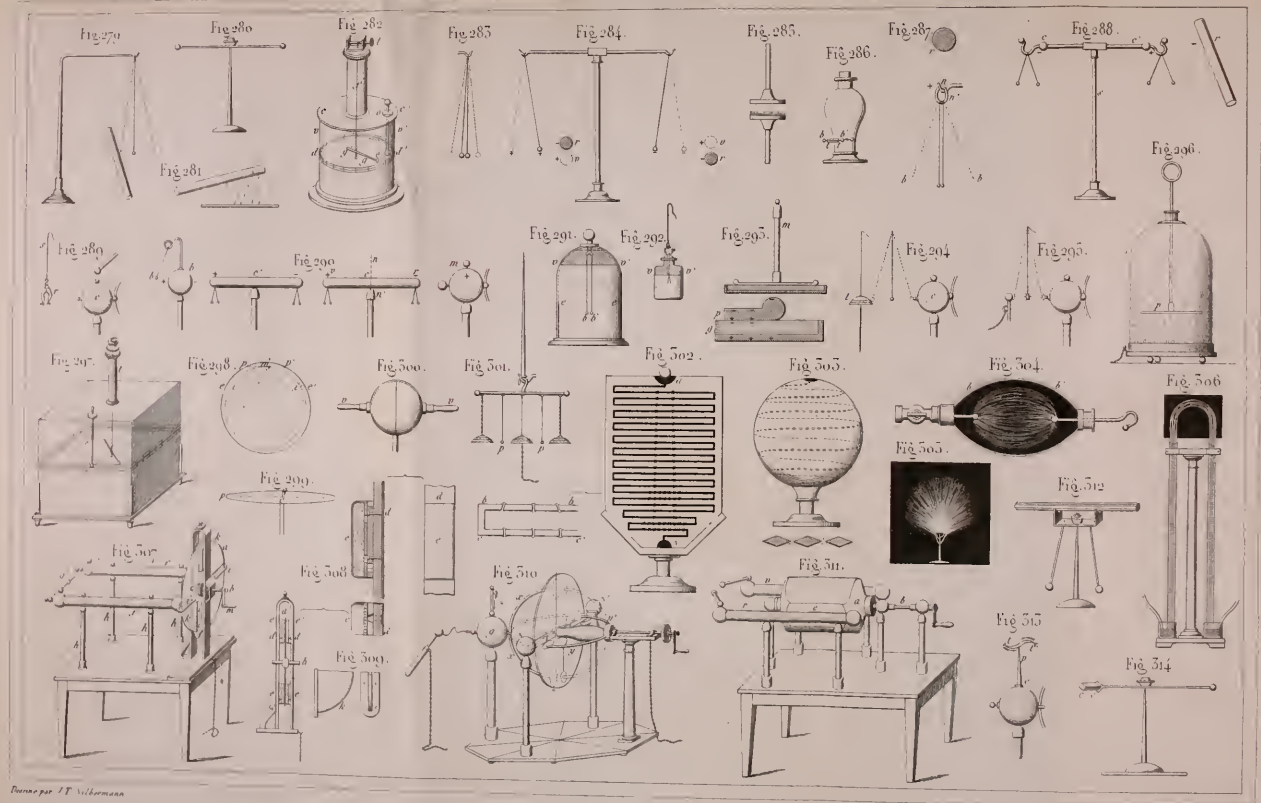
Dessiné par F. Delhomme

Vi. Blum Sculp



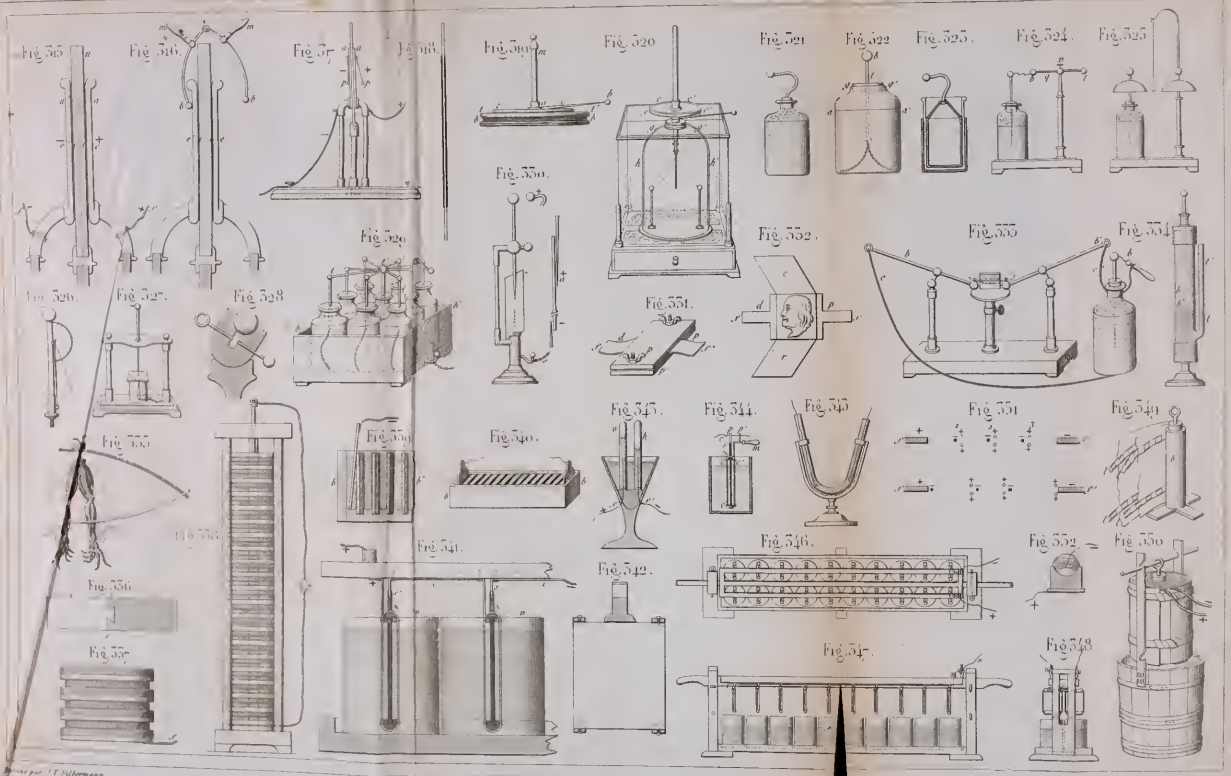
Jonas Jr sc. Thermann

F. Le Blanc Sculp



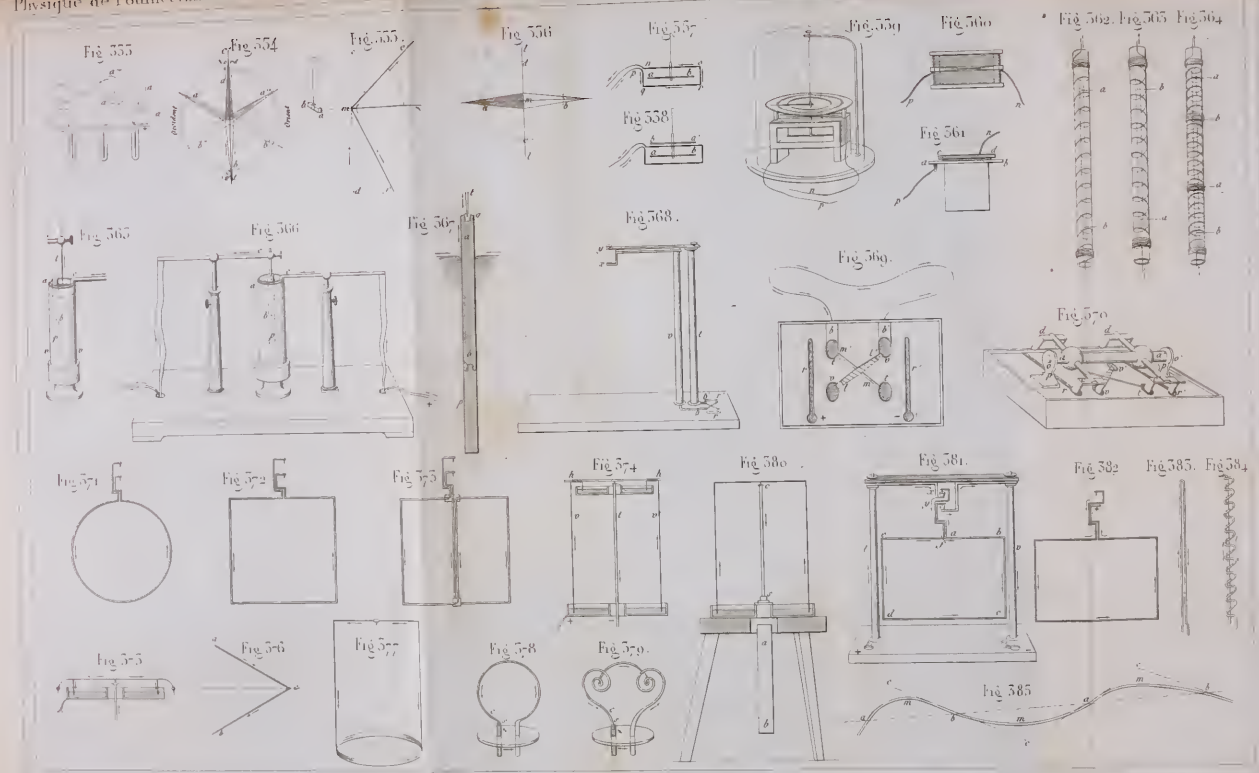
Dessiné par J.T. Vilbermann

V. Le Blanc Sculp



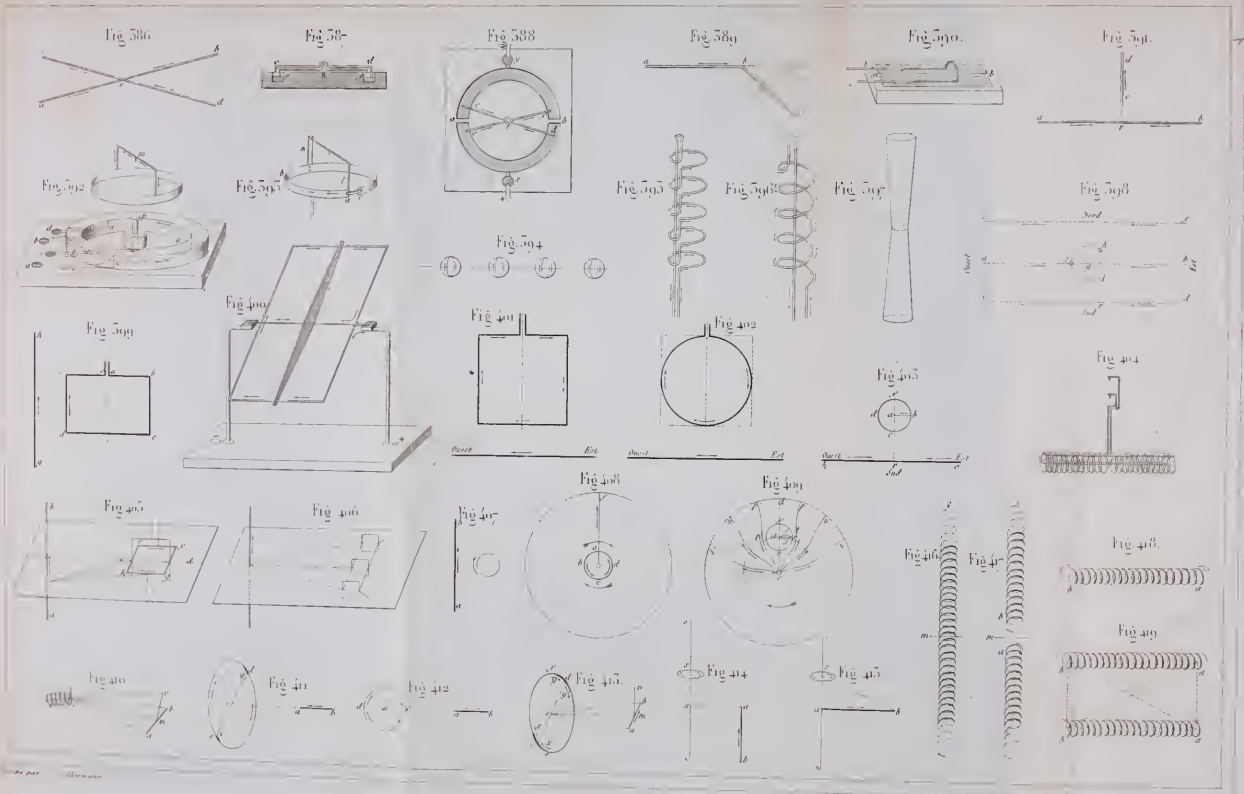
Gravé par J. F. Silbermann

Ch. Le Blanc sculp.



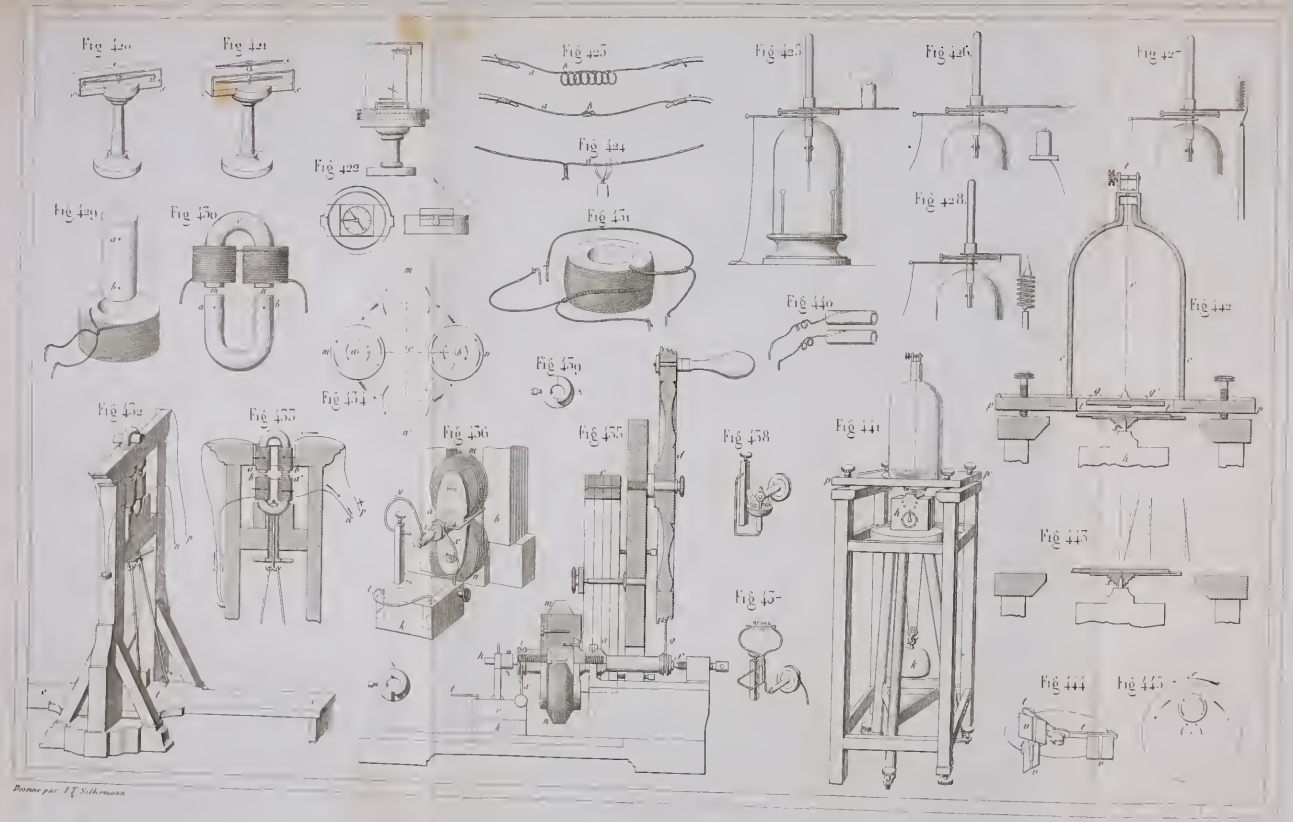
Dessiné par J. J. Silbermann

Vve Blan. Sculp.



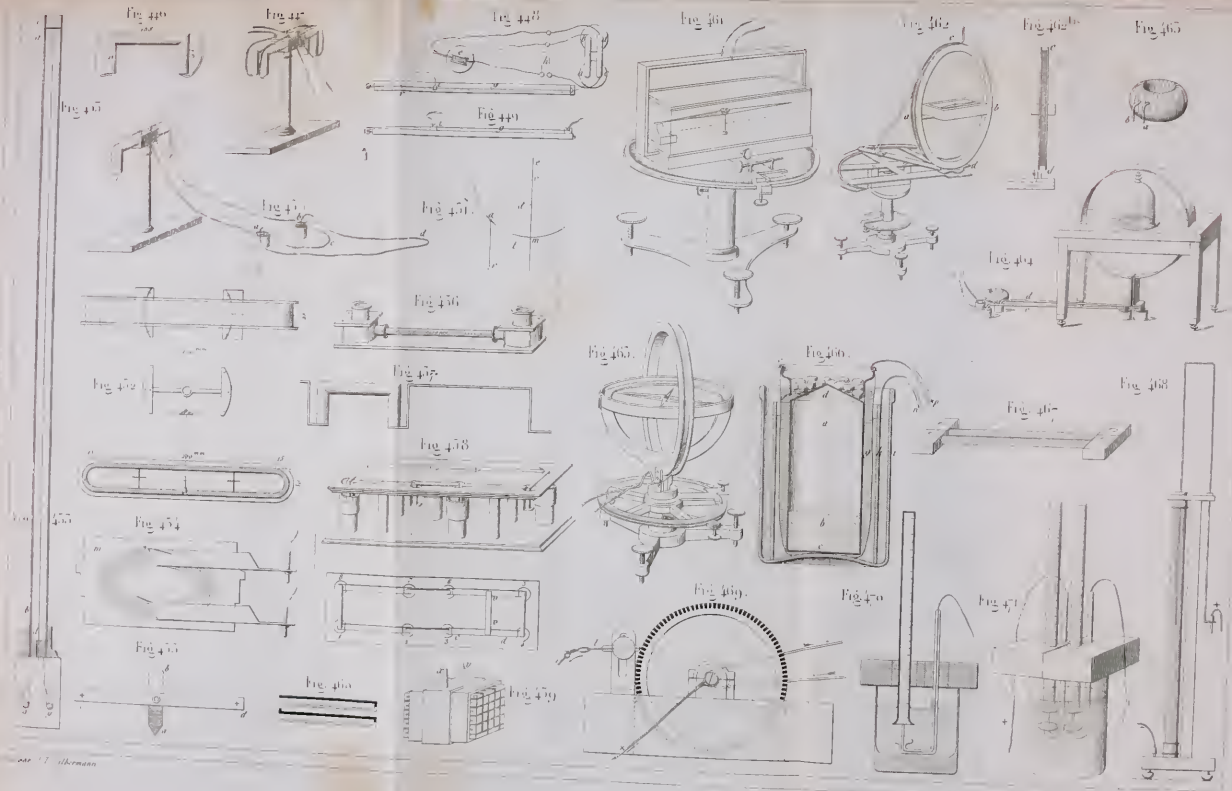
Ve par Alexander

Pl. Blanc Sculp



Dessiné par H. Silbermann

Gravé par Blanc



Gravé par T. Uhrmann

Vte Le Blanc Sculp.